한국분무공학회지 제26권 제4호(2021)
http://dx.doi.org/10.15435/JILASSKR.2021.26.4.1

표면플라즈몬공명 가시화 장치를 이용한 증발하는 이종혼합물 액적의 실시간 농도 가시화 기법 개발

정찬호* · 이형주* · 최창경** · 이형순* · 이성혁†

Development of the Real-time Concentration Measurement Method for Evaporating Binary Mixture Droplet using Surface Plasmon Resonance Imaging

Chan Ho Jeong, Hyung Ju Lee, Chang Kyoung Choi, Hyoungsoon Lee and Seong Hyuk Lee

Key Words: Droplet evaporation(액적 증발), Concentration measurement(농도 측정), Binary mixture droplet(이종혼합물 액적), Surface plasmon resonance imaging(표면플라즈몬공명 가시화)

Abstract

The present study aims to develop the Surface Plasmon Resonance (SPR) imaging system facilitating the real-time measurement of the concentration of evaporating binary mixture droplet (BMD). We introduce the theoretical background of the SPR imaging technique and its methodology for concentration measurement. The SPR imaging system established in the present study consists of a LED light source, a polarizer, a lens, and a band pass filter for the collimated light of a 589 nm wavelength, and a CCD camera. Based on the Fresnel multiple-layer reflection theory, SPR imaging can capture the change of refractive index of evaporating BMD. For example, the present study exhibits the visualization process of ethylene glycol (EG)-water (W) BMD and measures real-time concentration change. Since the water component is more volatile than the ethylene glycol component, the refractive index of EG-W BMD varies with its mixture composition during BMD evaporation. We successfully measured the ethylene glycol concentration within the evaporating BMD by using SPR imaging.

1. 서 론

상변화 현상의 일종인 액적 증발은 전도성 입자 코팅, 바이오 센서, 열교환기 등 다양한 산업 현장에 적용되고 있다[1,2]. 특히, 서로 다른 물질이 섞여 있는 이종혼합물 액적(Binary Mixture Droplet, BMD)의 경우 휘발성이 더 큰 성분이 먼저 증발하는 선택적 증발(selective evaporation) 현상이 나타난다[3,4]. 증발 과정 동안 선택적 증발 현상에 의해 BMD 내부에는 시공간상 농도 변화가 나타나며, 이는 표면장력, 포화증기압 등의 물성값 변화를 야기하고, 다양한 물리현상이 나타난다.

Christy 등[5]은 증발하는 에탄올-물 BMD 내부에 나타나는 복잡한 유동을 가시화하였다. 특히, 그들은 증발 초기에 나타나는 매우 복잡한 와류 유동가시화 결과를 보고하고 있다. 그리고 휘발성 에탄올 성분의 선택적 증발 현상으로 인해 액적-기체 계면의 에탄올 농도 변화를 만들어내고 액적 내부의 와류 유동을 만든다고 분석하였다. 액체-기체 계면의 국부 농도 분포에 따른 표면장력 구배가 solutal 마랑고니 유동과 같이 복잡한 유동을 만들어 낸다. 하지만 그들은 에탄올-물 BMD 내부의 농도 구배를 측정하지 못하였기 때문에 액적 내부에 복

(Received: 30 Nov 2021, Received in revised form: 15 Dec 2021, Accepted: 21 Dec 2021)
*중앙대학교 기계공학과
**Michigan Technological University, Department of Mechanical Engineering
†책임저자, 회원, 중앙대학교 기계공학부
E-mail: shlee89@cau.ac.kr
TEL: (02)820-5254 FAX : (02)814-9476

잡한 유동이 생기는 원인에 대하여 정성적인 분석만을 제공하고 있다. 이후에도, 여러 연구자들이 휘발성 물질과 물의 혼합물로 구성된 BMD의 증발 과정 중에 와류를 동반한 복잡한 내부 유동을 가시화하고 연구하였지만 농도 측정을 성공하지 못하여 정성적인 분석만을 제공하고 있다[6-8].

한편, Karpischka 등[9]은 비휘발성 물질들인 에틸렌글리콜, butanediol, propanediol을 물과 섞은 BMD의 경우 액적의 접촉각이 커지는 마랑고니 수축 현상이 나타난다고 보고하였다. 선택적 증발 현상에 의해 BMD 내부에 농도 및 표면장력 구배가 나타나고, 이는 액적 내부에 마랑고니 유동을 발생시킨다. 액적의 정점 부근의 표면장력이 접촉선 부근의 표면장력보다 큰 경우 접촉선에서 정점 방향으로 마랑고니 유동이 나타나며, 결과적으로 마랑고니 수축 현상을 일으킨다. 하지만 Karpischka 등[9]은 증발하는 BMD의 농도 측정을 수행하지 못하였고 정성적인 분석만을 제공하고 있다.

BMD의 선택적 증발 현상에 의해 나타나는 물리현상을 정량적으로 분석하기 위해서는 실시간 혼합물 농도 측정이 필수적이다. 하지만 현재까지 증발하는 혼합물 액체의 농도 변화를 측정 가능한 장치에 대한 연구가 제대로 수행되지 못하였다. 따라서, 본 연구에서는 증발하는 BMD의 실시간 농도 변화를 측정하기 위한 장치를 개발하였다. 이를 위한 표면플라즈몬공명 가시화 기법에 관한 이론적인 배경과, 농도 측정 활용 방법에 대해서 소개하였다. 마지막으로 에틸렌글리콜-물 BMD의 증발 과정을 가시화하고 정량적으로 농도를 측정하는 과정을 나타냈다.

2. 측정 기법

2.1 표면플라즈몬공명

Figure 1은 표면 플라즈몬 공명(Surface Plasmon Resonance, SPR)의 개념적 개략도를 나타낸다. 금속-유전체 계면에는 표면 플라즈몬이 나타난다[10]. SPR 현상이란 입사광에 의해 나타나는 소멸파 (evanescent wave)가 표면 플라즈몬과 공명되어 여기(excitation) 되는 물리적 과정이다.

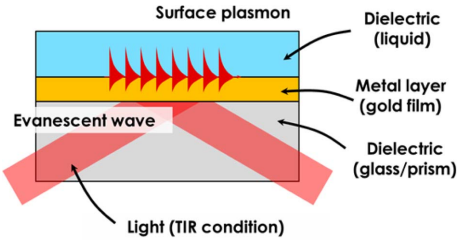

Fig. 1 The conceptual schematic of surface plasmon resonance (SPR)

SPR 현상을 보다 구체적으로 설명하면 다음과 같다[10]. 굴절률이 높은 매질에서 낮은 매질로 빛이 이동할 때 빛의 입사각이 임계각보다 크면 내부 전반사(Total Internal Reflection, TIR)가 나타난다. 이때 반사된 빛은 굴절률이 낮은 매질에 불균일한 전기장을 만들지만, 입사되어 들어온 대부분의 빛이 다시 굴절률이 높은 매질로 반사된다. 이때 나타나는 불균일한 전기장을 소멸파라고 하며, 보통 한 파장보다 짧은 거리에서 기하급수적으로 감소하게 된다.

하지만 금속층이 입사된 빛의 한 파장 길이보다 얇은 경우에는 소멸파가 금속층을 관통하고 표면 플라즈몬과 결합하게 된다. 특정 조건에서는 표면 플라즈몬이 소멸파와 공명하여 여기 하게 되며, 이 경우 내부 전반사 조건에서 반사광의 강도는 크게 감소한다. 이 현상을 표면 플라즈몬 공명(SPR)이라고 한다.

2.2 표면플라즈몬공명 이론

Kretschmann configuration으로 설계된 SPR 가시화 장치에 사용되는 일반적인 다층 금박막 구조는 Fig. 2와 같이 유전체-금속-유전체(프리즘)의 세 개의 층으로 구성된다. 일반적으로 입사광과 표면 플라즈몬 사이의 상호작용은 내부 전반사 조건에서 Fresnel multiple-layer reflection 이론을 기반으로 예측 가능하다[10]. 입사광이

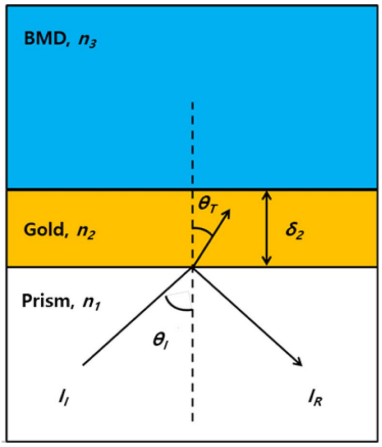

Fig. 2 The reflection in the multiple layers with Kretschmann configuration

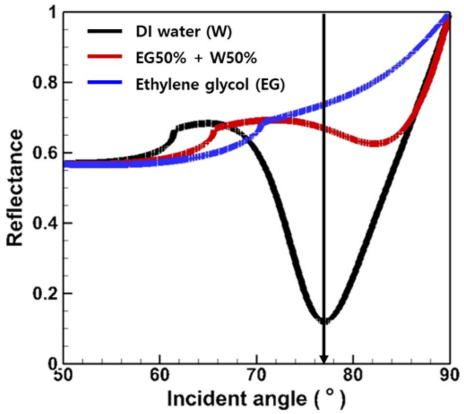

Fig. 3 The predicted reflectance with respect to the incident angle for different test medium

프리즘에서 금속-유전체 층으로 이동할 때 반사광의 강도 (I_R)은 다음과 같이 표현된다.

$$I_R = R \times I_I \tag{1}$$

여기서 R는 반사율을 나타내며, I는 입사광의 강도이다. 다층 박막에서의 이론 반사율은 다음과 같이 예측 가능하다.

$$R = |r|^2 \tag{2}$$

$$r = \frac{r_{12} + r_{23}\exp(2ik_2\delta_2)}{1 + r_{12}r_{23}\exp(2ik_2\delta_2)} \tag{3}$$

여기서 r은 박막 전체의 반사계수, r_{ij}는 i층과 j층 사이의 반사계수, k_i는 i번째 층의 파동벡터(wave vector), δ_2는 금박막의 두께를 나타낸다. 하첨자 i=1, 2 및 3은 각각 프리즘, 금속 박막 및 시험 매질(에틸렌글리콜-물 BMD)을 나타낸다. 그리고 p편광된 입사광에 대한 r_{ij}는 다음과 같이 표현된다.

$$r_{ij} = \frac{n_i\cos\theta_I - n_j\cos\theta_T}{n_i\cos\theta_I + n_j\cos\theta_T} \tag{4}$$

여기서 n_i는 i번째 층의 굴절률이고, θ_I와 θ_T는 각각 i층과 j층 사이의 빛의 입사각과 투과각이다. 식 (4)에서 반사계수는 i번째 매질의 굴절률 n_i에 따라 달라진다.

따라서 입사광의 파장과 입사각을 고정하면 반사율은 BMD의 굴절률 n_3에만 의존한다. 한편, 에틸렌글리콜-물 BMD의 굴절률은 에틸렌글리콜 농도에 따라 변한다. 예를 들어, 다양한 에틸렌글리콜 농도에 대한 굴절률은 (DI water의 경우 1.332), (EG50%의 경우 1.381), (EG100%의 경우 1.431) 이다. 반사율은 BMD의 에틸렌글리콜 농도에 따라 변한다. Fig. 3는 식 (3)과 (4)을 기반으로 BMD의 다양한 에틸렌글리콜 농도별 입사각에 따른 이론적 반사율 변화를 나타낸다. 검은색 실선은 금박막 위에

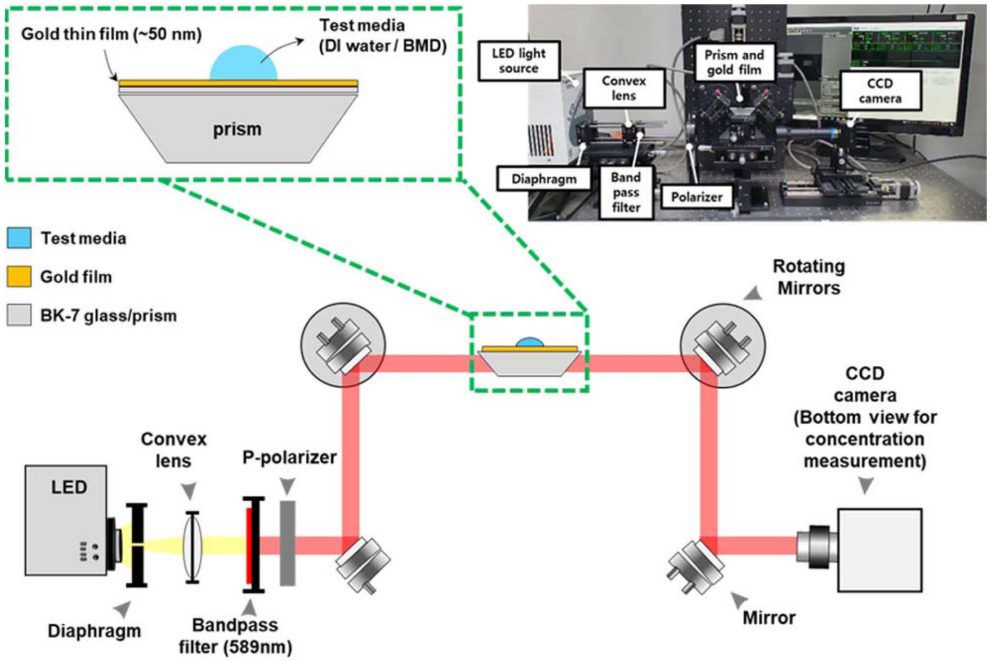

Fig. 4 The experimental setup for surface plasmon resonance (SPR) imaging

DI water액적이 놓인 경우의 반사율을 나타낸다. 입사광의 입사각이 77.04°인 경우 최소 반사율을 나타내며 이 경우를 DI water에 대한 SPR 각도라 지칭한다. 입사광의 입사각도를 77.04°로 설정하면 위에 놓인 에틸렌글리콜-물 BMD의 혼합비에 따라 입사광의 반사율이 달라지게 되며(DI water의 경우 0.119), (EG50%의 경우 0.667), (EG100%의 경우 0.737)이다. 이처럼 혼합물의 농도에 따라 반사율이 달라진다는 현상을 기반으로 증발하는 BMD의 혼합물 농도를 정량적으로 측정 가능하다.

본 실험은 외기온도 20±0.5°C, 상대습도 13±1.4%에서 수행되었다. 따라서 식 (4)에 사용되는 실험매질의 굴절률값 n_3은 20°C에서의 혼합물 농도에 따른 굴절률 값을 사용하였다. 고온의 실험 조건에 대해서 SPR 가시화 실험을 수행하기 위해서는 실험 온도에 대한 혼합물 농도에 따른 굴절률 값을 측정하는 것이 필수적이다.

제안된 SPR 가시화 실험장치의 이론적 굴절률 분해능은 10^{-6} 이다. 따라서, 일반적으로 물질간 굴절률은 10^{-2}~10^{-4} 수준의 차이를 보이므로, 거의 모든 혼합물에 대해서 동일한 수준의 농도 측정이 가능하다.

2.3 표면플라즈몬공명 가시화장치

Figure 4는 혼합물 농도 및 변화를 측정하기 위한 SPR 가시화 장치의 사진이다. SPR 가시화 장치의 구성은 Kretschmann 구성을 사용하였다. LED 광원(Sugar-CUBE™ LED Illuminator, Nathaniel Group)으로부터 나온 백색광은 광학 배열을 통해 평행광으로 시준된다. 평행광 시준을 위한 광학 배열에는 볼록 렌즈(Edmund Optics)와 조리개(Edmund Optics)를 사용하였다. 시준광은 band pass filter(589 nm, FWHM 10 nm, Edmund Optics)를 통해 단파장광으로 변환된다. 마지막으로 시준된 단파장광은 polarizer (Edmund Optics)을 통해 p-편광 되며, 거울 배열을 통해 프리즘으로 입사각을 조정한다. DI-water의 SPR각도인 77.04°입사각으로 고정하여 증발하는 BMD를 가시화하였다. 실험에 사용된 Kretschmann 배열은 Fig. 2와 같이 프리즘, 금박막, 매질로 구성된다. 프리즘은 589 nm파장에서 굴절률이 1.516인 BK-7 glass (Edmund Optics, Dove Prism) 재질로 되어있다. 금박막은 BK-7 glass 커버슬립 위에 2.5 nm의 티타늄 층과 47.5 nm 두께의 금으로 코팅하여 제작하였으며, index matching liquid (IML150, Norland, USA)를 사용하여 금박막을 프리즘에 부착하였다. 가시화에는 3.1 μm의 픽셀 해상도를 갖는 CCD 카메라(MD120CU-SY, XIMEA)에 1배율의 렌즈(1X SilverTL TM, Edmund optics)를 부착하여 촬영하였다.

2.4 SPR 이미지 후처리

SPR 이미지의 후처리의 첫 번째 단계는 반사율 보정 작업이다. Intensity 기반의 이미지는 보정 작업을 통해 픽셀별 반사율 기반 이미지로 변환된다. 먼저 scale factor, S를 사용하여 intensity 기반 이미지를 반사율 기반 이미지로 변환한다.

$$S = \frac{R_{EG-theo} - R_{W-theo}}{I_{EG-\exp} - I_{W-\exp}} \tag{5}$$

여기서 $R_{EG-theo}$ 및 R_{W-theo}는 순수 에틸렌글리콜과 물에 대해 식 (2)를 통해 이론적으로 예측된 반사율 값이다. $R_{EG-theo}$ 및 R_{W-theo}는 SPR 각도(θ=77.04°) 및 파장(λ=589 nm) 조건에서 각각 0.737 및 0.119이다. 다음으로 I_{EG-exp}와 I_{W-exp}는 각각 SPR 가시화 장치를 통해 측정된 순수 에틸렌글리콜와 물 이미지의 픽셀별 intensity를 나타낸다. 픽셀별 국부 intensity, I_{exp}에 scale factor, S 를 곱하여 반사율을 계산한다.

다음으로 보정계수, CF를 이용하여 반사율 값의 시스템 오차를 보정한다. 반사율 이미지에는 필연적으로 시스템 오차가 포함되며 이는 광원 및 표면의 불균일성 때문에 나타난다. 따라서 본 논문에서는 시스템오차를 보정하기 위한 보정계수 CF를 다음과 같이 정의하였다.

$$CF = S \times I_{W-\exp} - R_{W-theo} \tag{6}$$

마지막으로 보정된 반사율 값은 다음 식으로부터 얻는다.

$$R_c = S \times I_{\exp} - CF \tag{7}$$

여기서 하첨자 c 및 exp는 보정 그리고 실험 값을 나타낸다.

3. 결과 및 분석

3.1 에틸렌글리콜 농도 측정

농도 측정 장치의 검증을 위해 Fig. 5와 같이 10개의 에틸렌글리콜-물 BMD 시료를 준비하였다. 준비된 BMD의 에틸렌글리콜 질량 농도는 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 그리고 100% 이다.

Figure 6는 에틸렌글리콜 농도에 따른 SPR 가시화 장치의 반사율 신호를 나타낸 결과이다. 여기서 붉은 선은

Fig. 5 Prepared samples of ethylene glycol(EG)-water(W) binary mixture

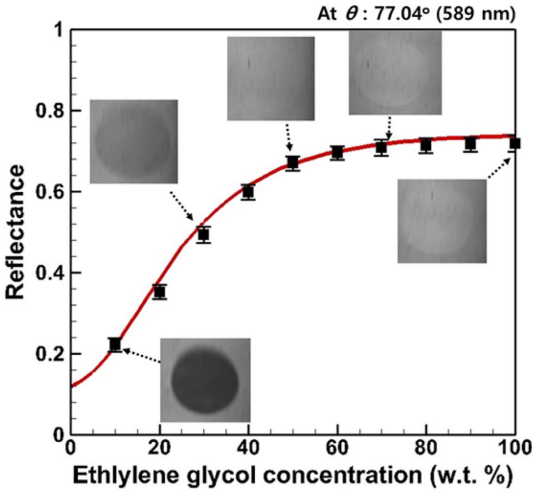

Fig. 6 A correlation between the reflectance and ethylene glycol concentration of BMD

식 (3)과 (4)를 따라 이론적으로 예측된 반사율이다. 검은색 기호는 에틸렌글리콜 농도 EG10%~EG100%까지 바꿔가며 실험적으로 측정한 반사율 신호이다. 이때 EG10% BMD의 반사율 이론값은 0.219이다. 그리고 EG10% BMD에 대해 5회 측정된 반사율의 평균값은 0.221이며, 측정 평균값과 이론 값의 차이는 1.1%로 나타났다. BMD의 에틸렌글리콜의 농도가 증가함에 따라 굴절률이 증가하여 반사율 이론값이 증가한다. 순수 에틸렌글리콜 액적의 경우 반사율 이론값은 0.737 로 가장 높다. 이때 순수 에틸렌글리콜 액적에 대해 5회 측정된 반사율의 평균값은 0.718이며, 측정 평균값과 이론값의 차이는 2.6%로 나타났다. 에틸렌글리콜 농도 EG10%~EG100% 에 대해 5회 반복 측정된 실험값의 이론값과의 오차는 Table 1에 정리하였다. 다음으로, 본 연구에서 제안된 SPR 가시화 장치의 농도 측정 불확도 분석을 위해 에틸렌글리콜 혼합물 농도 측정에 대한 표

Table 1 Error analysis of measurement data for different ethylene glycol concentrations

Case	Error
EG10% BMD	1.1 %
EG20% BMD	6.9 %
EG30% BMD	4.8 %
EG40% BMD	2.8 %
EG50% BMD	0.2 %
EG60% BMD	0.6 %
EG70% BMD	1.1 %
EG80% BMD	2.1 %
EG90% BMD	2.3 %
EG100% BMD	2.6 %

준편차, σ는 다음과 같이 계산하였다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{n=1}^{N}\left(\frac{\Delta x_n}{x_n}\right)^2} \quad (8)$$

이후 모든 그래프에 나타난 결과는 ± 2σ에 해당하는 95% 신뢰 구간을 나타내는 error bar로 나타내었다.

3.2 증발 과정 농도 가시화 결과

본 연구에서 개발된SPR 가시화 장치를 사용하여 증발하는 BMD실시간 농도 측정 실험을 수행하였다. 증발 실험에는 에틸렌글리콜-물 BMD를 사용하였으며, 초기 BMD의 에틸렌글리콜 질량 분율은 10%이며, 체적은 1±0.05 μl이다. 상온에서 실험을 수행하였으며, 측정된 외기의 온도는 20±0.5°C, 상대습도는 13±1.4% 이다.

시간에 따른 에틸렌글리콜 농도는 앞에서 설명한 대로 SPR 가시화 장치를 통해 촬영된 이미지의 반사율 신호를 후처리하여 측정된다. Fig. 7은 SPR 가시화 장치에 의해 촬영된 EG10% BMD intensity 기반 이미지를 나타낸다. 0초에서 흰색 점선 안의 밝은 회색 영역은 EG10% BMD 접촉영역을 나타낸다. 그리고 흰색 점선 안의 빛의 강도는 시간이 지남에 따라 점점 증가한다. 이는 흰색 점선 안에 있는 BMD의 굴절률이 변화하고 있음을 의미하며, 물 성분이 증발함에 따라 에틸렌글리콜의 농도가 증가하고 있음을 의미한다. 본 연구에서는 Fig. 6에 있는 반사율-에틸렌글리콜농도 사이의 상관 곡선을 회귀 모델로 만들어 증발하는 동안 측정된 BMD 내부 평균 반사율로부터 에틸렌글리콜 농도를 측정하였

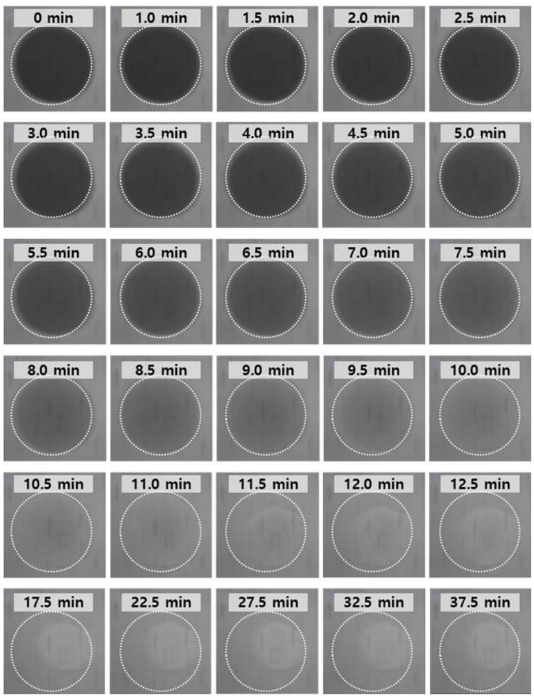

Fig. 7 The SPR images of evaporating ethylene glycol-water BMD

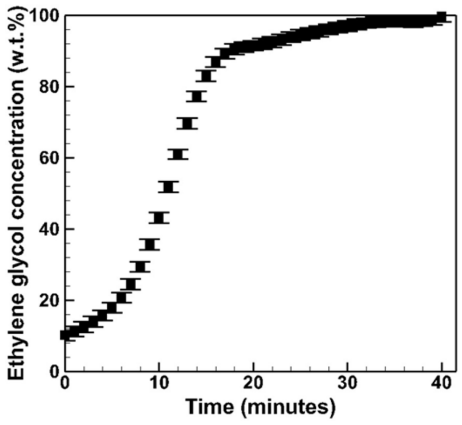

Fig. 8 The change of the area-averaged ethylene glycol concentration with time

다. SPR 장치를 통해 촬영된 intensity기반 이미지는 보정을 통하여 반사율 이미지로 보정 방법을 통해 반사율 이미지로 변환하였다.

Figure 8은 시간에 따라 측정된 에틸렌글리콜의농도 변화를 나타낸다. 결과에 따르면 액적을 시편 위에 고착시킨 직후의 반사율은 0.221으로 이에 상응하는 에틸렌 글리콜 농도는 10.2%이다. 이후 휘발성이 큰 물 성분의 선택적 증발 현상으로 에틸렌글리콜-물 BMD의 물 성분은 점점 줄어들게 되며, 에틸렌글리콜 농도가 점점 증가한다. BMD 내부 에틸렌글리콜 농도는 약 30분까지 증가하며, 30분에는 거의 모든 물 성분이 증발하고 BMD 내부에는 에틸렌 글리콜만 남게 된다.

3.3 SPR 가시화 장치 활용 방안 제언

본 연구에서 제안된 SPR가시화 장치는 실험매질의 굴절률에 따라 변하는 반사율에 수치를 부여하여 다양한 변수에 대한 계측시스템으로 활용 가능하며, 본 논문에서는 SPR 가시화 장치를 농도 계측시스템으로 활용하였다. 이러한 농도 계측시스템은 혼합물 액적을 이용한 표면 코팅 분야에서, 코팅 패턴에 중요한 영향을 미치는 증발 거동 혹은 내부 유동 분석에 사용 될 수 있다. 예를들어, 기판 위에 놓인 혼합물 액적은 증발하는 동안 국부적 농도 차이가 나타나며 이는 액적 계면에서의 표면장력 구배를 야기하고, 마랑고니 유동을 발생시킨다. 따라서, 마랑고니 유동의 원인이 되는 농도 분포를 측정함으로써 유동 발생 메커니즘을 분석 가능할 것으로 기대된다.

한편, SPR 가시화 장치는 나노스케일 실험매질 두께를 정량적으로 계측 가능하다. 식 (3)과 (4)에서 층의 개수를 4개층으로 확장하고, 3번 층은 나노사이즈 실험매질, 4번 층에는 공기 층으로 두어 실험매질 두께에 따른 반사율 변화를 예측할 수 있으며, 실험매질의 두께를 역으로 계측 가능하다. 이러한 두께 계측시스템은 코팅장치를 통해 도포된 액막 두께의 균일성을 평가 하는데에 활용 가능할 것으로 기대된다. 예를들어, 배터리 전극 제조 공정에서 음극재 및 양극재 슬러리를 알루미늄 박막이나 구리 박막 위에 얇은 박막 형태로 코팅하게 된다. 이때 SPR 가시화 장치를 이용하면 박막의 균일성 등을 평가할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 증발하는 혼합물 액적의 농도를 실시간 측정하기 위한 표면플라즈몬공명 가시화 장치를 개발하였고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) Fresnel multiple-layer reflection 이론 기반 표면플라즈몬공명 가시화 장치를 활용하면 촬영된 반사 신호를 기반으로 혼합물농도를 이론적으로 예측 가능하다.

(2) 표면플라즈몬공명 가시화 장치의 이미지 신호를

기반으로 혼합물의 농도를 정량적으로 측정하는 방법을 정립하였다. 또한, 측정 장치 검증 결과 에틸렌글리콜-물 혼합물액적 대해 평균 3% 이하의 농도 측정 오차를 보였다.

(3) 10% 에틸렌글리콜 질량 농도의 에틸렌글리콜-물 혼합물 액적에 대한 증발 실험을 수행하였고, 실시간 농도를 측정하였다. 결과에 따르면 에틸렌글리콜보다 휘발성이 큰 물 성분이 우선적으로 증발한다. 증발 후기에는 거의 모든 물 성분이 증발하고 에틸렌글리콜만 남는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단(과제번호: NRF-2021R1A2C3014510)의 연구지원으로 수행되었고, 산업통상자원부의 연구비 지원을 받았으며, 한국 에너지기술평가원의 에너지수요관리핵심기술 프로그램(과제번호:20212020800270)으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) D. Y. Zang, S. Tarafdar, Y. Y. Tarasevich, M. D. Choudhury and T. Dutta, “Evaporation of a Droplet: From physics to applications,” Phys. Rep., Vol. 804, 2019, pp. 1~56.

(2) D. Brutin and V. Starov, “Recent advances in droplet wetting and evaporation,” Chem. Soc. Rev., Vol. 47, No. 2, 2018, pp. 558~585.

(3) C. H. Jeong, H. J. Lee, D. Y. Kim, S. B. Ahangar, C. K. Choi and S. H. Lee, “Quantitative analysis of contact line behaviors of evaporating binary mixture droplets using surface plasmon resonance imaging,” Int. J/ Heat. Mass. Tran., Vol. 165, 2021, pp. 120690.

(4) C. H. Jeong, H. J. Lee, C. K. Choi and S. H. Lee, “Selective evaporation rate modeling of volatile binary mixture droplets,” Int. J. Heat. Mass. Tran., Vol. 178, 2021.

(5) J. R. E. Christy, Y. Hamamoto, and K. Sefiane, "Flow Transition within an Evaporating Binary Mixture Sessile Drop,” Phys. Rev. Lett., Vol. 106, No. 20, 2011.

(6) X. Zhong and F. Duan, “Flow regime and deposition pattern of evaporating binary mixture droplet suspended with particles,” Eur. Phys. J. E., Vol. 39, No. 2, 2016.

(7) H. Kim, F. Boulogne, E. Um, I. Jacobi, E. Button and H. A. Stone, “Controlled Uniform Coating from the Interplay of Marangoni Flows and Surface-Adsorbed Macromolecules,” Phys. Rev. Lett., Vol. 116, No. 12, 2016.

(8) R. Bennacer and K. Sefiane, “Vortices, dissipation and flow transition in volatile binary drops,” J. Fluid Mech., Vol. 749, 2014, pp. 649~665.

(9) S. Karpitschka, F. Liebig and H. Riegler, “Marangoni contraction of evaporating sessile droplets of binary mixtures,” Langmuir, Vol. 33, No. 19, 2017, pp. 4682 ~4687.

(10) J. I. Homola and J. Dostálek, Surface plasmon resonance based sensors, Springer series on chemical sensors and biosensors, Springer, 2006.