

진동 및 제어 부문 특별세션

초음파 분무 열분해 증착 제어 시스템 개발

김규언^a, 김영흠^a, 이치범^{a*}

Development of Control System for Ultrasonic Spray Pyrolysis Deposition

Kyu-Eon Kim^a, Yeong-Heum Kim^a, Chibum Lee^{a*}^a Mechanical System and Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 139-743, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	19	July	2014
Revised	26	July	2014
Accepted	30	July	2014

Keywords:

Transparent Conductive Oxide
Spray Pyrolysis Deposition
Ultrasonic Atomizer
Proportional-integral Controller

ABSTRACT

A control system for ultrasonic spray pyrolysis deposition was developed that can coat a large size glass panel with a transparent conductive oxide. It consists of several ultrasonic atomizer devices to cover a large area and a host computer for individually controlling the devices. The sub-controller in an ultrasonic atomizer device can adjust the flow rate of the atomized conductive oxide gas by setting the flow rate of the solution and regulating the level of the solution in the tank. To construct a feedback control loop for level regulation, a level sensor that utilized an infrared distance sensor and an electric circuit for adjusting the ultrasonic oscillator were developed. The host program was also developed, which can monitor and control the sub-controllers. A proportional-integral controller was developed for a simplified model, and its operation was verified through an experiment.

1. 서론

투명 전도성 산화물(transparent conductive oxide)은 첨단 산업의 필수적인 핵심 소재로 디스플레이나 태양전지, LED, 터치센서 등에 많이 이용되고 있다. 최근 광 및 전자소자의 발전과 더불어 효율이 높은 투명 전도성 산화물이 개발되고 있으며, 기존의 소형 디바이스 이외에 대면적의 경량 박판 투명 전도성 산화물막을 개발하여 건축물의 외벽 유리나, 차량용 유리 등에 광발전(photovoltaic)을 응용하려는 노력이 이루어지고 있다.

이러한 대면적 광발전 소자를 현재는 화학기상증착(chemical vapor deposition: CVD)이나 스퍼터링(sputtering) 공정을 통해 제작할 수 있으나, 경제적이 아니다. 투명 전도성 산화물막을 제작하기 위하여 비용이 저렴한 분무열분해 증착(spray pyrolysis deposi-

tion: SPD) 공정^[1-3]을 이용하려는 시도가 있으며, 이 경우 경제적으로 대면적 코팅할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 대면적 분무열분해증착 시스템을 제어할 수 있는 시스템을 개발하였다.

Fig. 1은 분무열분해 증착할 때 서브스트레이트에 투명 전도성 산화물을 형성하는 예를 보여준다. 증류수에 프리커서(precursor)를 용해한 용액을 고온의 코팅 챔버에서 분무시키면 응결과 중합을 거쳐 증류수는 증발하고 서브스트레이트 위에서 화학반응을 통해 결정핵이 형성되고, 결정성장에 의해 박막이 형성된다^[4]. 결정의 상태는 프리커서의 종류, 증착온도, 노즐과 서브스트레이트 사이의 거리, 분무량, 촉매의 유무 등의 인자에 의해서 정해지며, 이를 통해 박막의 광투과율이나 표면 저항, 헤이즈(haze) 특성이 달라진다. 일반적으로 분무 열분해 증착은 에어로졸(aerosol)을 이용하는 방식^[5]과 초음파 분무장치(ultrasonic atomizer)를 이용하는 방식^[6]이 있다.

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-9667

Fax: +82-2-974-8270

E-mail address: chibum@seoultech.ac.kr (Chibum Lee).

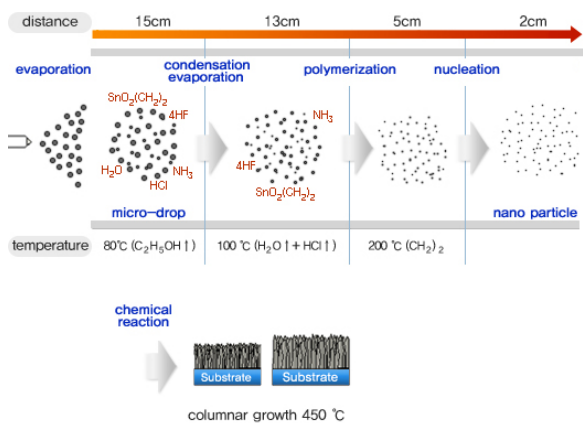


Fig. 1 Principle of Spray Pyrolysis Deposition

2. 연구의 배경

Fig. 2에 나타난 것과 같이 대면적 패널에 고르게 코팅하기 위해 다수의 초음파 분무장치를 병렬로 채택하였다. 초음파 분무 열분해 증착 장치는 가정용 가습기에 사용되는 초음파 압전진동자를 이용하여 액적을 발생시키고, 압축기(compressor)에서 발생한 이송 가스의 압력으로 코팅 챔버로 이동시킨다. 슬릿노즐을 통해 챔버에서 수직 방향으로 분무하여 가열된 패널 위에 결정층을 성장시킨다. 스테이지가 이동하면서 대면적을 코팅하게 된다.

기존에는 초음파 열분해 증착 시에 가정용 초음파 가습기를 개조하여 수동으로 초음파 진동자에 가해지는 교류 전압의 진폭을 조절하였다. 이 경우 용액 온도의 변화나 수조 내 용액의 높이가 변화에 대해 분무량을 일정하게 조절하기 어렵다. 또한, 초음파 압전진동자의 특성에 편차가 존재하고, 시간에 따라 산화에 의해 성능이 감소하는 데 이러한 요인들이 박막의 두께를 고르게 유지하기 어렵게 만든다. 제어시스템이 필요한 또 다른 이유는 다수의 초음파 분무장치가 위치별로 서로 다른 분무량을 발생시켜야하기 때문이다. 중앙에 있는 분무시스템과 양끝단에 있는 분무시스템이 동일한 분무량을 발생시키면 패널 표면 중앙에서 코팅되는 두께가 달라지므로, 이를 상쇄하기 위하여 중앙부의 분무량을 적게, 양끝단의 분무량을

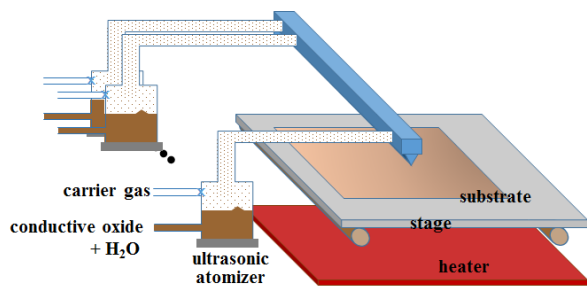


Fig. 2 Schematic of ultrasonic spray pyrolysis deposition system for large area

크게 설정하여야 한다.

본 연구의 목적은 다수의 초음파 분무장치를 동시에 조절하는 제어기를 개발하는 것이다. 이를 위하여 각 분무장치 별로 지정된 분무량을 공급 받아서 이를 일정하게 유지할 수 있도록 개별 제어 시스템을 구성하고, 다수의 분무 장치를 통합적으로 제어할 수 있는 호스트 PC 제어프로그램을 제작하였다.

3. 분무 장치의 구성

각 분무장치별로 지정된 분무량을 일정하게 발생시키기 위하여 피드백 제어를 도입하였다. Fig. 3은 다채널 분무장치 제어 시스템의 구조를 보여준다. 본 시스템은 전체 시스템을 관장하는 상위의 호스트와 수조, 수위 센서, 발진회로, 마이크로컨트롤러를 포함한 하위 개별 분무장치로 구성되어 있다. 호스트에서 각 채널 별로 공급 분무량을 지정하면, 호스트는 개별 마이크로컨트롤러에 이를 전달하고, 이에 따라 정량 공급 펌프는 필요한 유량을 공급한다. 개별 마이크로컨트롤러는 수위 센서를 통하여 변화하는 수위를 측정하고, 초기의 지정된 수위에 비교하여 초음파 압전진동자에 가해지는 교류 전압의 진폭을 조정하는 피드백 제어를 실현한다. 또한 현재의 상태 변수를 호스트에 전달하여 모니터링을 할 수 있도록 하고, 압전 진동자의 교체시기에 대해 알려준다.

3.1 초음파 압전진동자와 발진회로

초음파 분무의 원리는 압전진동자가 발생시키는 고주파 진동에 의한 압력이 물기둥을 형성하고, 이 경계면과 표면에서 간섭과가 발생하며 공동 현상(cavitation)을 통하여 액체 표면에서 액적이 증기 형태로 방출되게 된다. Kelvin 방정식에 의해 주어진 온도와 밀도에서 압전 진동자의 진동주파수는 액체 표면의 곡률을 결정하고, 이는 분무되는 액적의 크기를 결정한다. 일반적으로 가정용 가습기에 많이 사용하는 압전진동자는 고유진동수가 1.65 MHz이고, 분무되는 액적의 크기가 5 μm 내외이며, 진동수가 올라감에 따라 액적의 크기는 더 줄어들게 된다^[7]. 초음파 분무 열분해 증착의 경우, 증류수에 용매가 흡착하여 분무되므로, 용매비에 따라 가장 적

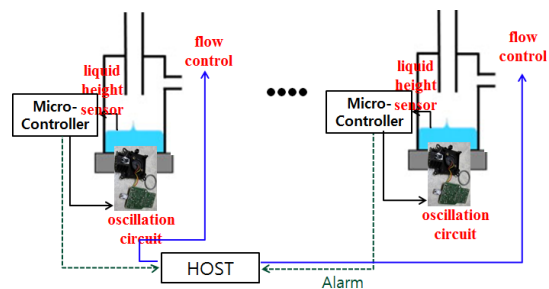


Fig. 3 Multi-channel ultrasonic atomizer control system

합한 고유진동수가 있을 것으로 예상된다. 본 연구에서는 시중에서 일반적으로 구할 수 있는 1.65 MHz와 2.4 MHz 압전진동자 중에서 액적의 크기를 고려하여 1.65 MHz 압전진동자를 사용하였다.

발진회로는 압전 진동자의 고유진동수인 1.65 MHz의 교류 전압을 발생시키게 되는 데, 일반적으로 인덕터, 캐퍼시터, 트랜지스터를 조합하여 공진을 발생시키는 Colpitts 회로를 응용한 자가 발진회로를 많이 사용하며, Fig. 4에 나타나 있다. 단순화를 위하여 압전진동자를 캐퍼시터로 모델링하였으며 실험결과 1600±20 pF을 사용하였다. Fig. 5는 30 V의 전압이 공급되었을 때, 진동자에 가해지는 교류전압을 Spice로 해석한 결과와 실험 결과를 비교한 것이다. 진동수의 경우 해석 결과에서 1.65 MHz, 실험결과에서 1.695 MHz로 나타났으며 해석과 실험 모두 약 1A의 전류를 필요한 것으로 나타났다.

발진 회로를 의도하는 제어기의 액츄에이터로 사용하기 위해서는 압전진동자의 출력을 연속적으로 조절할 수 있어야 하는 데 일

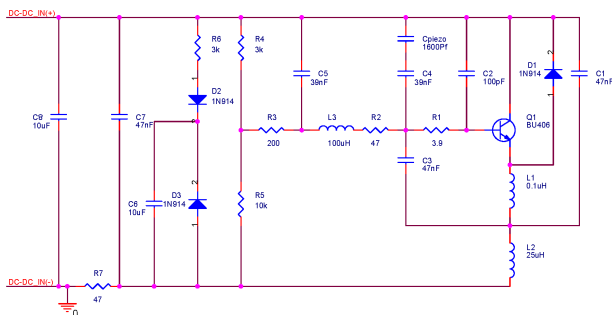
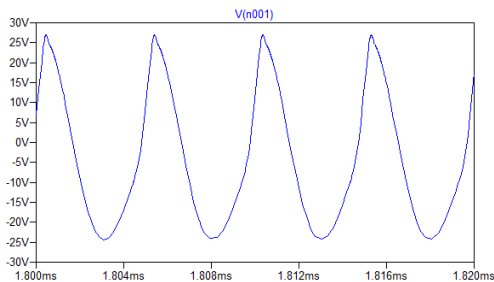
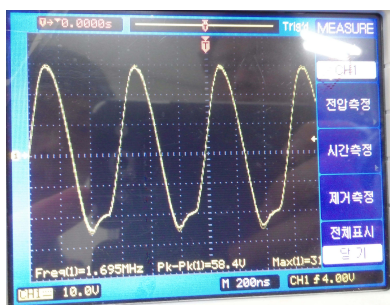


Fig. 4 Oscillator Circuit for Ultrasonic Atomization



(a) Spice Simulation Result



(b) Experimental Result

Fig. 5 AC Voltage Acting on Piezo Oscillator

반적인 가습기의 회로로는 이것이 불가능하다. 가정용 가습기는 가변저항을 분압기(voltage divider)로 사용하거나, 디지털 방식은 트랜지스터를 스위치로 이용하여 3단내지 4단의 저항을 연결하여 교류 전압의 진폭을 조절한다. 이를 위해서 진동회로에 공급되는 전압을 조절하였다. 가변저항을 대신하여 디지털 포텐쇼미터 (digital potentiometer)를 장착할 경우 1.65 MHz에서 저항과 동일한 역할을 할 수 없었으며, 트랜지스터를 이용하여 3단이나 4단을 만드는 것은 연속적인 제어를 어렵게 한다. 본 연구에서는 발진회로의 입력 직류 전압을 가변하여 사용하도록 하였다. 자가 발진회로 자체에 직류 전압을 부여하면 이를 설정된 진동수로 동일한 진폭의 교류 전압으로 발진을 하므로, 입력전압을 가변해줄 수 있는 별도의 회로를 제작하였다. 전압조정기는 최대 36 V 공급전압으로부터 7~34 V로 감압을 할 수 있어야 하며, 최소 1A 이상의 전류를 발생시킬 수 있어야 하며 연속적으로 전압을 조절할 수 있어야 한다. Fig. 6는 개발된 감압 전압 조정회로로, 상단부분은 기본적인 감압회로이고, 하단부분은 기준 전압값을 변경하여 출력 전압을 변경할 수 있도록 하는 부분이다. 발열 문제와 전기 효율을 고려하여 스위칭 레귤레이터인 LM2576를 이용하였으며, 저비용으로 구현하기 위하여 마이크로컨트롤러에서 PWM 신호를 사용하여 전압조정이 가능하도록 하였다. 마이크로컨트롤러의 5V PWM 출력이 D3에 입력되면, 그 입력에 의해 값이 선형적으로 변화하게 되며 그 관계는 식 (1)로 표현되고, Fig. 7에 나타나있다. LM2579의 V_{ref} 은 1.23 V이다.

$$V_{out} = V_{ref} \left(1 + R_4 \frac{R_5 + R_3}{R_5 R_3} \right) + \frac{R_4}{R_3} \left(PWM \frac{5R_2}{R_1} - 2.5 \frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) \quad (1)$$

실험결과 의도하는 대로 PWM에 대하여 전압이 변화하였으며 30 V에서 2A까지 전류를 공급하는데 문제가 없었다. 최대값은 레

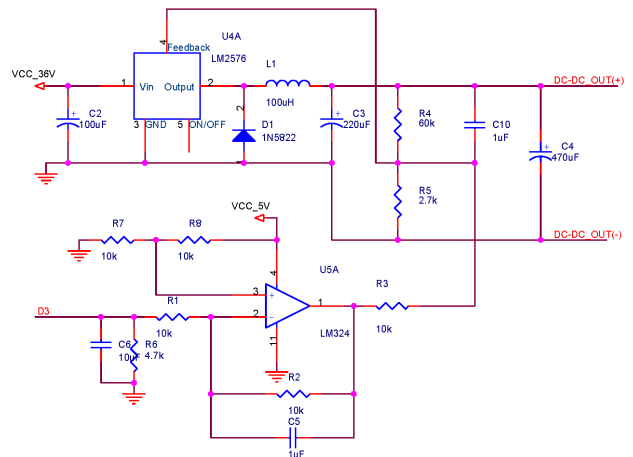


Fig. 6 Stepdown DC-DC converter with PWM voltage adjustment

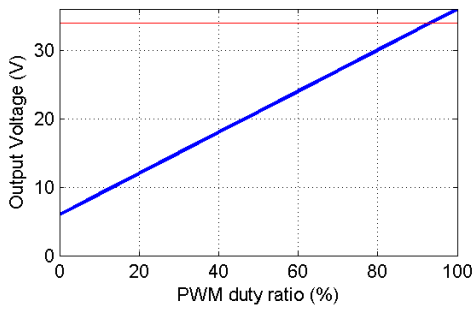


Fig. 7 DC Voltage Output from Regulator Circuit

플레이터 특성에 따라 34 V(Fig. 7의 적색 선)에서 포화되었다.

3.2 기구

Fig. 8은 폴리프로필렌(polypropylene)으로 제작한 수조를 보여준다. 상단면의 중앙관은 분무된 액적이 코팅 체임버로 배출되는 통로이고, 밸브는 이송기체를 주입하기 위해 압축기와 연결되며, 그 외의 정량펌프로부터 일정량의 용액을 공급하는관이 연결된다.

측면 하단부 연결관을 통하여 수위 측정용 실린더와 연결된다. 하단부에 장착된 압전 진동자가 동작하면 수조탱크의 수위는 표면이 일정하지 않고 격렬하게 움직이므로 외부로 측정용 실린더를 분리하여 수위를 측정한다.

3.3 수위센서

수위를 일정하게 유지하기 위하여 수위를 측정할 센서가 필요하다. 연속적으로 변화하는 수위를 측정하기 위하여 용액에 담구어 저항을 측정하거나, 외부에서 캐퍼시턴스를 측정하는 방식이 검토



Fig. 8 Solution tank and cylinder for liquid level measurement

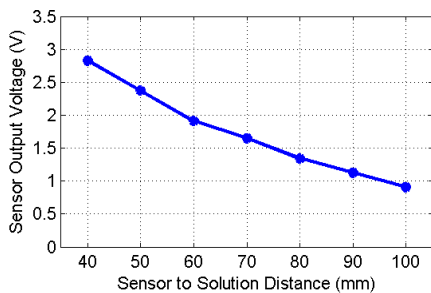


Fig. 9 Measurement of Solution Level Height

할 수 있다. 투명 전도성 산화물의 특성상 용액과 직접 접촉하면 산화되는 특성이 있어서 저항 측정은 어렵고, 이온이 포함되어있고 캐퍼시턴스 측정 방법도 부적합하다. 따라서, 부표를 용액에 띄우고, 그 높이를 측정하는 방법을 이용하였다. 적외선 센서로는 Sharp사의 GP2Y0A41SK를 이용하였으며, 측정 거리 d 는 40 mm에서 100 mm까지 민감도가 높은 구간을 범위로 설정하였다. 진동자 표면으로부터 센서까지 거리가 135 mm이므로, 진동자 표면에 대해 정의된 수위 h 에 대해서는 $u=135-d$ 를 이용하여 계산한다.

3.4 정량공급 펌프

튜브 연동 펌프(peristaltic pump)를 이용하여 정량을 공급하도록 하였다. 튜브를 이용하므로 산화가 발생하지 않으며, 튜브의 변경을 통하여 미량을 공급하도록 설정이 가능하다. 본 시스템에 사용한 초음파 압전 진동자는 최대 6 mL/min이므로 내경이 1 mm인 튜브를 사용하였다. 연동 펌프로는 longer pump사의 T100 series OEM peristaltic pumps를 이용하였다.

3.3 마이크로컨트롤러 및 통신 프로토콜

개별 제어기는 수위 측정, 제어입력인 발진회로 입력 전압 계산, 연동 펌프의 속도 조절, 호스트와 통신 등 역할이 필요하다. 열분무 증착은 수 십분에서 수 시간이 걸리는 과정이므로, 제어가 초당 1회 정도만 샘플링을 해서 제어 입력을 계산하고, 호스트와 통신하여도 충분하다. 마이크로컨트롤러로 저가의 16 MHz로 동작하는 ATmega328P를 사용하였다. 호스트로부터 일대다 통신이 필요하므로, RS485 통신을 이용하였으며, 이를 위하여 MAX485를 별도로 부착하여 사용하였다.

4. GUI 프로그램 제작

다수의 분무장치를 제어하기 위한 호스트 프로그램은 Fig. 10에 나타난 것과 같이 개발하였다. 개별 분무장치의 마이크로컨트롤러

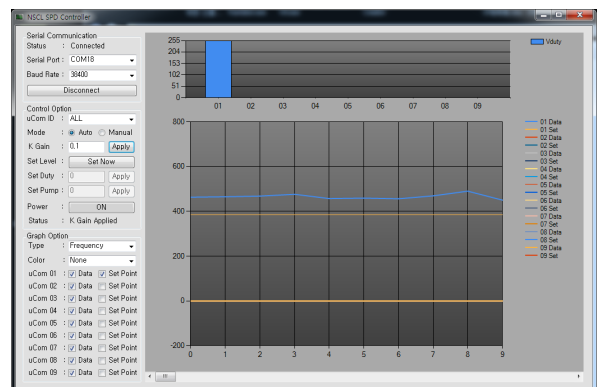


Fig. 10 Host PC Program

는 타이머 인터럽트(timer interrupt)로 지정된 샘플링 시간에 따라 피드백 제어를 수행하고 있다가 호스트로부터 명령이 수신되면, 이를 수행하고 응답으로 현재 상태를 송신하도록 되어있다. 현재 나타나는 것은 식별번호 01으로 연결되어 있는 개별 분무장치 한 개를 실험하고 있는 상태이다.

개별 분무장치에 일정시간마다 명령을 송신하며, 응답을 받아 그래프로 표기한다. 식별번호 01번 분무장치에 명령을 전달하고, 응답을 받은 후, 순차적으로 다음 분무장치와 통신을 수행한다. 모든 개별분무장치와 통신을 마친 후에는 타이머가 다음번 통신 시점을 발생시킬 때까지 대기한다. 프로그램에서 내보내는 명령은 각 개별 분무장치별로 지정하거나 전체를 동시에 지정할 수 있으며, 발전회로를 켜고 끄는 동작, 정량공급 모터의 속도 지정, 피드백 제어를 켜고 끄는 동작, 제어게인 값을 지정, 현재 수위를 초기 설정 값으로 새로 지정하는 동작, 피드백 제어 없이 수동 작동 시 발전회로 입력 전압을 지정하는 동작 등이다.

5. 제어기 설계 및 실험

수위에 따른 분무 효율을 실험한 결과, 분무가 가장 잘 일어나는 것은 수위가 초음파진동자로부터 약 45 mm 지점일 때로 나타났다. 이 수위를 기준으로 수위를 일정하게 유지하는 제어를 수행한다. 수위 조정 블록 다이어그램은 Fig. 11과 같다. 초기 설정 수위 (mm) r , 정량 펌프에서 공급되는 용액량(ml/min) d , 수위센서에서 측정되는 수위(mm) y , 진동자 발전회로 공급전압 u 에 대하여 $C(s)$ 는 제어기, $P(s)$ 는 발전회로와 진동자에 의해 분무량, $(1/A)(1/s)$ 는 용액 공급량과 분무량의 차이를 적분하여 높이로 변환하는 전달 함수이다. 정량 펌프에서 공급되는 용액량 d 와 초기 설정 수위 r 에 대한 수위센서 측정 수위 y 와 오차 e 의 관계는 다음과 같다.

$$Y(s) = \frac{C(s)P(s)}{C(s)P(s) - As} R(s) - \frac{1}{C(s)P(s) - As} D(s) \quad (2)$$

$$E(s) = \frac{-As}{C(s)P(s) - As} R(s) + \frac{1}{C(s)P(s) - As} D(s) \quad (3)$$

본 제어기의 목적은 측정 수위 y 가 초기설정 수위 r 와 일치하지 않거나, 공급량 d 가 변화하는 경우에 대하여 $r-y$ 가 0이 되도록 제어입력인 공급전압 u 를 자동으로 조절하는 것이다. 적절한 제어기

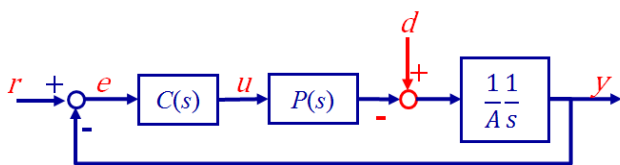


Fig. 11 Block diagram of level regulation system

의 형태를 알아내기 위하여, 분무 시스템 $P(s)$ 를 단순화하고, PI 제어기를 검토하였다. $P(s)$ 는 전압 입력에 대하여 압전진동자가 발생시키는 분무량으로, 입력인 전압 이외에 용액의 온도, 수위 등에 의해 변화한다. 실제 실험을 통한 결과는 약 45 mm 수위에서 온도를 27도로 유지할 경우, 30 V에서 약 5.5 mL/min, 12 V에서 1 mL/min가 되었으나, 동특성을 측정하기 어려웠다. 실제로는 다양한 변수가 복합적으로 비선형 특성을 보일 것으로 추정되나, 분무 열분해 공정에서도 수십 분 동안 공정이 진행되므로 동적인 특성은 무시하고 정적 시스템 α 으로 가정하였다. 비례적분 제어기 $C(s) = (k_i/s) + k_d$ 로 가정하여 (3)에 대입하면, 식 (4)와 같다.

$$E(s) = \frac{As^2}{As^2 - k_p\alpha s - k_i} R(s) - \frac{s}{As^2 - k_p\alpha s - k_i} D(s) \quad (4)$$

정상 상태에서 $E(s)$ 가 0이 되어야 하므로, 최종값(final value theorem)^[8]을 적용하면 다음과 같다. 설정 수위 r 과 공급량 d 가 단위 계단 함수(unit step function)로 가정하였다.

$$e(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{As^2}{As^2 - k_p\alpha s - k_i} - \frac{s^2}{As^2 - k_p\alpha s - k_i} \right) \quad (5)$$

식 (5)의 결과에 따르면 비례 제어 만으로는 $e(\infty) = 0$ 을 만족시킬 수 없으며 적분 제어를 같이 사용하여야 함을 알 수 있다. 페루프 시스템의 극점이 $s = (k_p \pm \sqrt{k_p^2 + 4Ak_i})/2A$ 이므로, 점근적

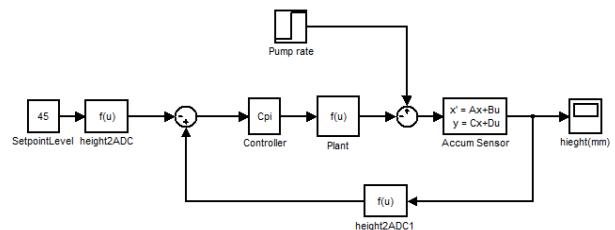


Fig. 12 Simulink model of ultrasonic spray control system

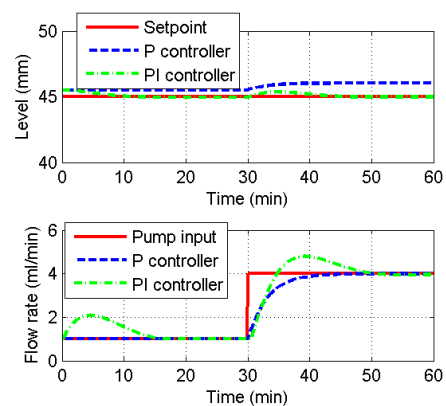


Fig. 13 Simulation results of ultrasonic spray control system

안정(asymptotic stable) 조건을 만족시키기 위해서는 비례 제어 계인과 적분 제어 계인이 $k_p < 0$, $k_i < 0$ 을 만족하여야 함을 알 수 있다.

Fig. 12와 13은 Simulink로 모델과 그에 따른 해석 결과를 보여 준다. 제어 계인을 $k_p = 30$, $k_i = 0.1$ 로 설정하였으며, 초기수위 45 mm이고, 공급 유량은 초기 1 mL/min에서 30분 후 4 mL/min로 변화하였다. Fig. 12에서 비례 제어와 비례적분제어의 차이를 비교 하였다. 비례제어의 경우, 수위의 오차를 보상하지 못하고, 정상상태 오차가 존재하게 되며, 비례적분 제어는 응답에 차이는 있으나 의도한 제어성능을 보인다. 공급량 그래프에서 보이는 바와 같이, 초기 1 mm의 수위 차이를 없애기 위해 약 10분 정도의 시간이 소요되며, 외부 공급 유량의 변화를 추종하는 데에도 약 10분의 시간이 걸린다. 이와 같은 느린 응답을 보이는 이유는 첫째 외부 공급 유량의 변화가 적분된 후에야 계측 가능하기 때문이며, 둘째 압전 진동자가 5.5 mL/min라는 상위 한계값을 가지므로, 제어 계인을 크게 할 수 없기 때문이다.

실제 동작 중에는 초기 수위의 차이는 피드백제어를 시작하기 전에 새로 수위를 지정하므로 발생하지 않는다. Fig. 14는 물을 이용한 실험 결과를 보여준다. 처음 시작 시 측정된 수위를 초기 추종 수위로 설정하고, 3 mL/min의 입력을 부여하였다. Fig. 14 상단은 수위값을 보여주는 것으로 제어설정값(Fig. 11의 r)과 출력값(Fig. 11의 y)를 비교한 것으로 실제 수위가 0~100 mm로 변화할 수 있으나 1 mm 이내로 비교적 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다. Fig. 14 하단의 실제 제어 입력은 해석과 다른 양상을 보였는데 이는 해석 시에 이용한 입력전압-분무량 관계가 비선형 특성을 보이며 전압 상승시와 전압 하강시 특성이 상이하기 때문으로 판단된다. 센서의 응답이 매우 느리므로, 초기에 1분 가까이 반응이 없다가 제어 신호가 증가하기 시작하고, 최대값에 도달하게 된다. 이후 분무량이 커져서 수위가 변동하면, 제어 신호가 불안정적으로 하락하게 되며 이후 정상상태 값으로 수렴한다. 제어 입력 전압이 증가

하는 경우, 분무량이 증가하고, 덕트를 통한 토출량도 일정하게 증가한다. 반면, 제어 입력 전압이 하강하는 경우, 분무량이 감소하더라도, 수조 내 이미 기화된 액적이 남아있으므로, 실제 토출량으로 줄어들기 시간차를 보인다. 현재 실험 결과 분무량은 전압에 지배적으로 영향을 받지만, 이송 압축공기의 압력이나 분사방향, 수위, 온도 등의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 향후 전도성 산화물을 사용하면 용액의 종류와 농도 등에 따라 다른 특성을 보일 것으로 예상된다. 전반적으로 응답은 해석결과보다 빠르게 나타나지만, 선형적이지 않으므로, 입력전압-분무량 관계에 관한 보다 정확한 모델을 수립해야 해석적으로 제어기 설계가 가능할 것으로 보인다.

6. 결론

본 연구에서는 대면적 패널에 분무열분해 공정으로 투명 전도막을 코팅하기 위한 분무장치 제어 시스템을 개발하였다. 다수의 초음파 분무장치를 개별로 제어하는 시스템과 이를 총괄하여 통제하는 호스트 프로그램을 개발하였다.

각 분무 장치별로 호스트로부터 지정된 분무량을 수조에 공급하도록 하였으며, 수위를 측정하여 이를 일정하게 유지하도록 압전진동자에 부여되는 전압을 조정함으로써 피드백 제어 회로를 구성하였다. 이를 위해 적외선 센서를 이용한 수위 측정 센서를 개발하였고, 전압을 연속적으로 조절할 수 있는 전기 회로를 개발하였다. 이러한 개별 분무장치에서 일정 분무량을 공급할 수 있도록 비례적분 제어기를 이용하여 피드백을 구성하여 실험을 수행하였다.

현재의 시스템은 의도하는 작동을 수행하기는 하지만, 응답 속도나 안정성 등 제어시스템 측면에서 개선의 여지가 있다. 우선, 제작된 수조의 단면적이 매우 크므로, 이를 수위 센서가 공급량을 반영하는데 오랜 시간이 걸린다. 설계 개선을 통하여 수조의 단면적을 줄일 예정이다. 또한 제작한 시스템에서 30V 전원 공급 장치를 사용하므로 제어 입력 전압이 28V까지로 제한되어 있으나, 이에 따라 분무량의 조절범위가 제한되어 있으므로, 이를 36V까지 증가시킬 예정이다. 현재 제어기에서는 입력 전압 u 가 임의의 값인 17V에서 시작하여 정상 상태에 찾아가도록 하였으나, 지나치게 시간이 오래 걸렸다. 향후 실험을 통해 공급 유량에 따라 정상 상태를 구하고, 이를 제어시 제어 입력 초기값으로 이용하여 공급 유량의 변화를 즉각적으로 반영하도록 수정할 예정이다. 이를 기반으로 대면적 분무 장치를 이용한 전도막 코팅 실험을 진행할 계획이다.

후기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

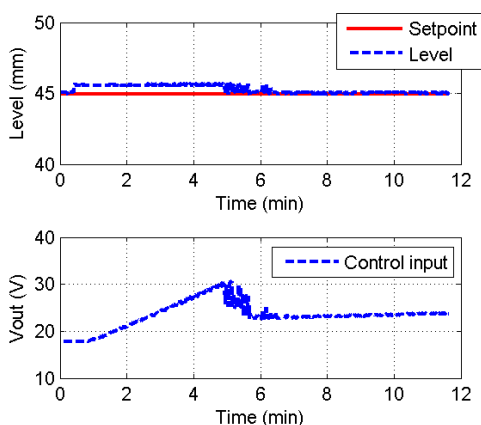


Fig. 14 Experimental results of ultrasonic spray control system

References

- [1] Kim, T., 1995, The Deposition of SnO₂ Films by Spray Pyrolysis, *Solar Energy* 15:2 91-99.
- [2] Kim, S., Yoon, C., 1998, Preparation of Transparent and Conducting Tin Oxide Films by the Ultrasonic Spray pyrolysis, *Journal of the Korean Industrial and Engineering Chemistry* 9:2 214-219.
- [3] Lee, J., Yoshikawa, S., Sagawa, T., 2014, Fabrication of Efficient Organic and Hybrid Solar Cells by Fine Channel Mist Spray Coating, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 127 111-121.
- [4] Kim, S. H., Kim, J.H., Ahn, J. Y., Kim, J. M., 2014, Synthesis and Patterning of TiO₂ Nanoparticles using Electrospray Systems, *Spring Conference of The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers* 213-213.
- [5] Kim, B. J., Hong, S. K., Kim J., Lee J. B., Lee, H. G, Hong., G. W., 2010, Deposition of YBCO Thin Film by Aerosol Assisted Spray Pyrolysis Method using Nitrate Precursors, *Progress in Superconductivity* 12:1 68-73.
- [6] Dhonge, B. P., Mathews, T., Sundari, S. T., Thinaharan, C., Kamruddin, M., Dash, S., Tyagi, A.K., 2011, Spray Pyrolytic Deposition of Transparent Aluminum Oxide (Al₂O₃) films, *Applied Surface Science* 258:3 1091-1096.
- [7] Kim, B. C., O, J. H., Im, G. J., 2010, Study on the Characteristics of Ultrasonic Humidifier, *the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers* 23:5 34-47.
- [8] Ogata, K., 2009, *Modern Control Engineering*, 5ed, Prentice Hall, USA.