

컴퓨터교육학회 논문지 2026년 제29권 제3호
https://doi.org/10.32431/kace.2026.29.3.007



영상 인식 및 파형 제어 결합형 EHD 미세 토출 시스템 설계 및 최적화*

Integration of Image Processing and Waveform Control for EHD-Based Micro-Dispensing of High-Viscosity Fluids

강동성[†]
Dongseong Kang[†]

요약

본 연구는 전기수력학(Electrohydrodynamic, EHD) 기반 미세 토출 공정을 영상 처리 및 신호 제어 알고리즘을 통해 최적화하는 방법을 제안한다. 고점도 용액의 안정적인 Taylor cone 형성 및 균일 액적 토출을 위해 노즐 직경, 인가 전압, 전극 거리, 액체 곡면 크기, 전압 파형 등 주요 공정 변수를 변화시키며 실시간 비전 분석과 전압 파형 제어 로직을 적용하였다. Basler acA1600-20gc 카메라를 통해 측정된 Taylor cone 각도 및 액적 직경 데이터는 Python 기반 OpenCV 라이브러리로 처리하였고, 신호 제어부는 NI-DAQ 및 임베디드 제어 보드에서 구현하였다. 실험 결과, Vision-Feedback 기반 제어를 적용하면 토출 직경의 표준 편차가 18% 감소하였으며, Multi DC + Sine pulse 조건에서 최소 9 μ m의 액적 직경이 구현되었다. 본 연구는 마이크로 LED, 마이크로프린팅 등 고정밀 제조 공정에서 AI 기반 자동 보정 시스템 설계에 활용될 수 있다.

주제어 전기수력학, 고점도 용액, 미세 토출, 컴퓨터 비전, 신호 제어, Taylor cone

ABSTRACT

This study proposes a method to optimize an electrohydrodynamic (EHD)-based micro-dispensing process using image processing and signal control algorithms. To achieve stable Taylor cone formation and uniform droplet dispensing of high-viscosity solutions, key process variables such as nozzle diameter, applied voltage, electrode distance, liquid surface area, and voltage waveform were varied, and real-time vision analysis and voltage waveform control logic were applied. Taylor cone angle and droplet diameter data measured using a Basler acA1600-20gc camera were processed using the Python-based OpenCV library, while the signal control unit was implemented on an NI-DAQ and embedded control board. Experimental results showed that applying vision-feedback-based control reduced the standard deviation of the dispensing diameter by 18%, achieving a minimum droplet diameter of 9 μ m under multiple DC + sine pulse conditions. This research can be utilized in the design of AI-based automatic compensation systems for high-precision manufacturing processes such as microLEDs and microprinting.

Keywords Electrohydraulics, High viscosity solution, Microdispensing, Computer vision, Signal control, Taylor cone

[†]정회원 (주)오엘테크 부설연구소 연구소장 (CTO)

논문투고 2025년 08월 20일
심사완료 2025년 09월 13일
게재확정 2025년 09월 24일
발행일자 2026년 03월 22일

* 본 논문은 한국생산기술연구원 연구개발직립금사업 "미소 중력 장치내 반도체 미세회로 패터닝 리페어를 위한 하이브리드 펌프 개발" 과제번호(UR250021)의 지원으로 수행한 연구임.

1. 서론

최근 디스플레이, 반도체, 바이오프린팅 등 고부가가치 산업 분야에서는 마이크로·나노 단위의 정밀한 액적(滴) 토출 기술이 핵심 제조 요소로 부상하고 있다 [1-3]. 특히, 마이크로 LED 디스플레이의 픽셀 형성, 반도체 칩 패키징 공정의 솔더 범프 도포, 바이오프린팅에서의 세포·고분자 하이드로겔 패턴링 등은 높은 위치 정밀도와 액적 크기 제어 능력을 동시에 요구한다 [4-5]. 이러한 응용에서는 토출되는 액적의 부피가 수피코리터(picoliter) 이하 수준이어야 하며, 토출 안정성 및 재현성이 제품의 품질과 직결된다 [6].

전통적으로 사용되어온 기계식 잉크젯(mechanical inkjet) 방식은 압전소자(piezoelectric actuator)나 열기포(thermal bubble)를 이용해 액적을 분사한다 [7]. 그러나 이 방식은 고점도 용액이나 입자 함량이 높은 재료의 토출에 한계가 있다. 점도가 수십~수백 cP를 넘어가면 노즐 내부에서의 유동 저항이 커지고, 토출 속도 및 액적 형상이 불안정해진다. 또한, 노즐 막힘(clogging) 현상이 빈번하게 발생하며, 이는 유지보수 비용 증가와 공정 신뢰성 저하로 이어진다 [8]. 이러한 문제로 인해 고점도 용액 및 고농도 슬러리 기반의 첨단 제조 공정에서는 기존 잉크젯 방식의 적용이 제한적이다.

이러한 한계를 극복하기 위해, 전기수력학(Electrohydrodynamics, EHD) 기반의 미세 토출 기술이 주목받고 있다. EHD 방식은 노즐 끝단에 전기장을 인가하여 액적 형성을 유도하며, 이를 통해 노즐 직경보다 작은 액적을 형성할 수 있다. 이로써 고점도 용액이나 점탄성 재료도 안정적으로 토출 가능하며, 더 작은 패턴 해상도를 구현할 수 있다 [9]. 특히, EHD 제트 프린팅(EHD jet printing)에서의 Taylor cone 형성은 핵심 메커니즘으로, 노즐 팁에 형성된 액적 표면이 전기장에 의해 원뿔형 구조를 이루고, 임계 전기장 강도를 초과하면 미세 제트가 방출된다 [10].

그러나 안정적인 Taylor cone 형성과 균일한 액적 토출을 구현하기 위해서는 인가 전압, 파형 특성, 노즐 직경, 공급 유량, 전극 간 거리 등의 공정 변수를 정밀하게 제어해야 한다. 실제 산업 응용에서는 재료 특성과 환경 조건에 따라 이러한 변수들이 시시각각 변하며, 미세한 편차가 액적 크기와 토출 빈도의 불균일성을 초래한다. 기존의 개방형 루프(open-loop) 방식 제어는 공정 변화에 실시간 대응하기 어렵기 때문에, 고품질·고정밀 제조를 위해서는 실시간 모니터링과 피드백(feedback) 제어가 필수적이다.

기존 연구들은 주로 단일 물리 변수 제어(전압·전극 거리 등)나 개방형 루프 방식에 머물렀으나, 본 연구는 비전 기반 Taylor cone 형상 지표를 직접 참조값으로 삼아 파형을 피드백 제어하는 통합 프레임워크를 처음으로 제시한다. 이를 통

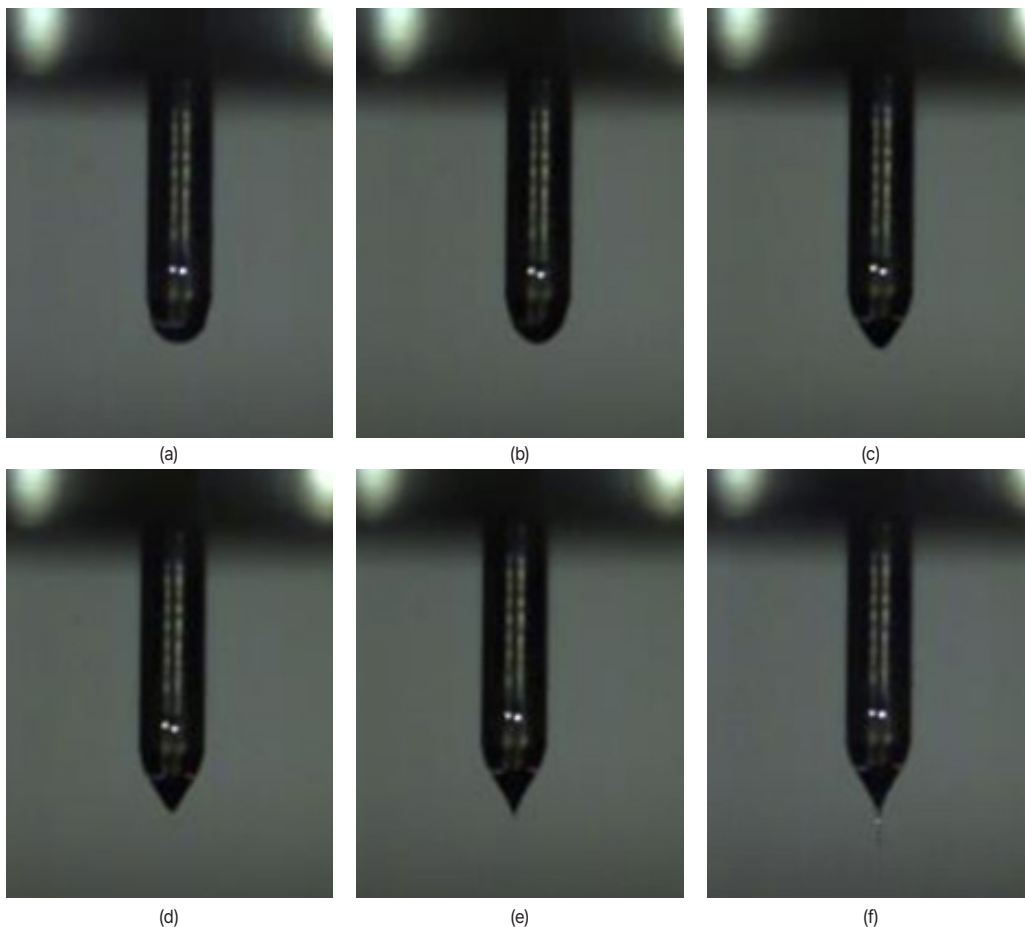


Figure 1. Taylor cone angle according to voltage. (a) 0V, (b) 2,000V, (c) 3,000V, (d) 4,000V, (e) 5,000V, (f) 6,000V.

해 기존 제어 방식의 응답성 부족과 안정성 한계를 동시에 극복하였다. 머신비전 카메라를 통해 Taylor cone의 기하학적 특성(각도, 길이, 곡률 등)을 실시간으로 계측하고, 이 데이터를 바탕으로 제어 신호를 동적으로 조정하는 Vision-Feedback 기반의 종합적 제어 시스템을 구축하였다. 이러한 접근 방식은 공정 변화에 대한 실시간 대응 능력을 크게 향상시키고, 고점도 용액을 사용하는 첨단 제조 공정에서의 생산 안정성, 재현성, 그리고 생산 효율을 동시에 확보할 수 있음을 목표로 한다.

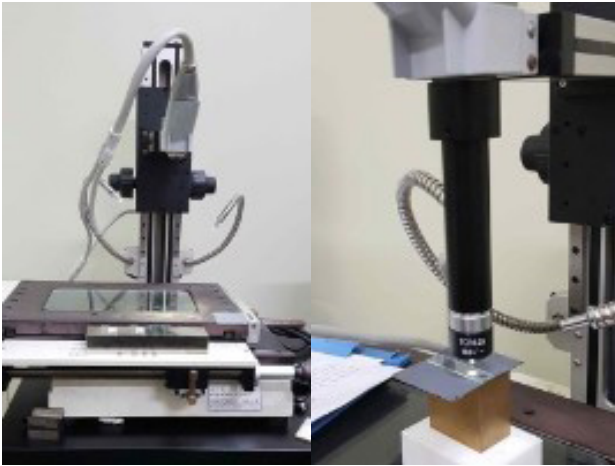


Figure 2. microscope system.

2. 관련 연구 동향

2.1 EHD 미세 토출의 물리 모드와 공정 변수

EHD 기반 미세 토출은 전기장, 유체, 계면력의 상호작용에 의해 dripping, micro-dripping, cone-jet, electrospray 등 다양한 동작 모드로 구분되며, 이 중 Taylor cone이 안정적으로 형성되고 미세 제트가 지속적으로 분사되는 cone-jet 모드가 산업적 활용에 가장 적합하다. 선행 연구에서는 이러한 모드 전이와 액적 직경, 방울 빈도에 영향을 미치는 주요 변수로 인가 전압과 전계 분포(DC, 펄스 주기·듀티·라이즈/폴 특성, 복합 파형에 따른 임계 전계 및 제트 안정성 변화), 노즐과 기판(전극) 간 거리(전계 집중과 space-charge 효과, 비정상 제트 발생 경향), 유량(공급 압력) 및 노즐 직경·재질(점도, 표면장력, 전도도와 복합 영향), 그리고 잉크(재료)의 물성(점도, 표면장력, 유전상수, 전도도, 점탄성 등 시간 의존적 특성)이 제시되어 왔다. 그러나 이러한 공정 변수들은 허용 범위가 매우 좁고, 변수 간 비선형적 상호작용이 크기 때문에 단순 개방형 설정만으로는 장시간 안정적인 운전이 어렵다. 이에 따라, 공정 안정성을 확보하고 균일한 토출 품질을 유지하기 위해서는 실시간 관측과 피드백 기반의 제어 접근이 필수적으로 요구된다.

2.2 고속 비전 기반 모니터링

EHD 토출의 동특성을 직접 관측하기 위해 고속 영상 촬영과 이미지 프로세싱 기법이 널리 활용되어 왔다. 주요 접근 방법으로는 첫째, cone의 기하학적 형상 지표(꼭지각, 길이, 곡률, 목(neck) 직경)와 제트의 직경·길이, 위상 상태(steady/whipping), 그리고 위상 천이 빈도를 정밀하게 추출하는 형상 분석 기법이 있다. 둘째, 광도나 윤곽선의 미세 진동 신호를 FFT 또는 웨이블릿 분석을 통해 주파수 영역에서 해석함으로써 모드 불안정성을 조기에 탐지하는 주파수 분석 기법이 적용된다 [11-12]. 셋째, 역광과 측광 조명의 조합, 하이게인(high-gain) 카메라, 짧은 노출 시간 설정 등을 통해 모션 블러를 최소화하는 광학 조건 최적화가 이루어진다. 넷째, 실시간성 확보를 위해 에지 기반 또는 윤곽 추적 기반의 경량화된 알고리즘을 사용하고, ROI(관심 영역) 최적화와 GPU·FPGA·엣지 NPU를 활용한 하드웨어 가속 기법이 적용된다. 그러나 이러한 기술에도 불구하고 노이즈, 섬광, 제트 미세화 시 신호대잡음비(SNR) 저하, 재료별 굴절률·흡수율 차이로 인한 대비 감소, 그리고 프레임 지연(latency)에 따른 제어 대역폭 한계 등이 여전히 중요한 기술적 제약으로 지적되고 있다.

2.3 전압 파형 설계와 페루프 제어

전통적으로 EHD 토출은 정전계(DC) 또는 단순 펄스 신호로 구동되었으나, 최근에는 파형 공학(waveform engineering)과 페루프 제어 기술의 발전이 병행되면서 보다 정밀하고 안정적인 제어가 가능해지고 있다. 파형 공학 측면에서는 전압 오버슈트 및 소거(suppression) 제어, 다단 펄스 설계, 펄스폭 변조(PWM), 주기·듀티비·슬루율 최적화를 통해 cone-jet 모드 진입 시간을 단축하고 위핑(whipping) 현상을 억제하는 기법이 활용된다. 제어 기법 측면에서는 PID 제어, 게인 스케줄링, 내부모델제어(IMC)와 같은 고전적 방식이 Taylor cone의 꼭지각이나 제트 직경과 같은 형상 지표를 참조변수로 삼아 적용되고 있으며, 보다 고도화된 방식으로는 전압 한계와 열적·전기적 안전 조건을 고려한 모델예측제어(MPC)가 파형을 실시간으로 갱신하는 데 사용된다. 또한, 재료 물성의 편차와 외란(온도, 습도, 노즐 오염 등)에 대응하기 위해 강건 제어 기법이 도입되고 있다. 그러나 이러한 접근 방식 모두에서 공통적으로 직면하는 핵심 과제는, 비선형성과 시간변화를 포함한 모델 불확실성과 센싱-구동 과정에서 발생하는 지연(latency)을 동시에 해결해야 한다는 점이다.

2.4 데이터 기반 모델링과 학습 기반 제어

복잡한 전기-유체-계면 상호작용을 포함하는 다물리 EHD 시스템은 단일 물리 기반 모델링이 어려워, 이를 보완하기 위한 데이터 중심 접근이 빠르게 확산되고 있다. 대표적으로, 가우시안 프로세스 회귀(GPR), 랜덤포리스트, 신경망 등을 활용한 대리모델(surrogate model)은 전압, 유량, 전극 거리, 노즐 특성, 유체 물성 등 입력 변수와 cone 및 제

트 형상 지표 간의 매핑을 근사하며, 소량 데이터로도 효율적인 학습과 불확실성 추정이 가능하다는 장점이 있다. 또한, 베이지안 최적화(BO)는 액적 직경, 방울 생성 빈도, 균일성 등 목표 성능을 만족하는 공정 조건을 고비용 실험 환경에서도 효율적으로 탐색할 수 있게 한다. 비전 해석 분야에서는 U-Net이나 DeepLab 계열 네트워크를 사용해 cone 및 제트 영역을 분할하고, keypoint 검출로 꼭지점을 추적하며, LSTM이나 Temporal Convolution을 적용해 동역학 변화를 예측하는 방식이 활용되고 있다. 더 나아가, 강화학습(RL)을 통해 파형 파라미터를 행동으로 정의하고 cone 안정성 및 액적 편차를 보상 함수로 설계하여, 모델 프리 기반의 최적 제어를 탐색하는 시도가 이루어지고 있다. 그러나 이러한 접근은 시뮬레이터와 실제 시스템 간의 성능 차이(Sim2Real gap)가 여전히 큰 한계로 작용하며, 이를 완화하기 위해 도메인 랜덤화와 온폴리시(on-policy) 미세 튜닝 기법이 병행되고 있다. 그럼에도 불구하고, 재료나 노즐 변경 시 일반화 성능 저하, 학습 데이터 수집 비용, 그리고 실시간성과 안전 제약을 동시에 만족하는 학습 프레임워크 설계의 복잡성은 여전히 해결해야 할 과제로 남아 있다.

2.5 멀티모달 센싱과 시스템 통합

비전 기반 분석의 한계를 보완하기 위해 전류·전하 센싱을 통한 전기적 피드백, 음향·진동 센싱을 활용한 whipping 현상 및 방울 충돌 검출, 그리고 정전용량 측정이나 광학 간섭계를 이용한 미세 계면 변화 감지 등 다양한 센싱 기법을 병행하는 연구가 확대되고 있다. 이를 지원하기 위해 엣지 컴퓨팅을 적용하여 고속 비전 처리와 제어 연산을 동일 엣지 장치에서 수행함으로써 네트워크 왕복 지연을 최소화하고, 디지털 트윈 기술을 통해 전산 유체 해석과 전기장 시뮬레이션을 데이터 기반 모델과 결합하여 파형-형상 응답을 사전에 탐색하는 접근이 도입되고 있다. 또한, 산업 현장에서의 신뢰성을 확보하기 위해 안전·신뢰성 엔지니어링 개념을 적용, 노즐 막힘·오염·방전 위험에 대한 이상 감지와 폴백(fallback) 로직을 구현하고 자동 퍼지(purge)-세정 시퀀스를 운용하는 방안이 제시되고 있다. 이러한 기술들은 장시간 무인 안정 운전(수시간~수일 규모), 고점도·고고형분 잉크 호환성, 그리고 생산 라인 속도에 대응 가능한 시스템 구현이라는 산업적 요구를 충족시키는 핵심 요소로 작용한다.

2.6 본 연구의 필요성

선행연구들은 EHD 토출의 물리 메커니즘, 파형 설계, 비전 분석, 개별 제어 기법 등에서 부분적으로 최적화 성과를 거두었으나, 여전히 고점도·점탄성 재료에 대한 일관된 페루프 안정화 사례가 제한적이며, 실시간 비전 지표(예: 꼭지각, 목 직경)를 제어 참조값으로 직접 연결한 체계적 프레임이 부족하다. 또한, 재료나 노즐 교체 시 제로샷 또는 소샷 학습 기반으로 일반화할 수 있는 학습-제어 통합 전략이

미흡하고, 엣지 환경에서 수 밀리초~수십 밀리초 수준의 실시간성을 보장하며 안전 메커니즘까지 포함하는 경량 파이프라인의 표준화가 필요하다. 이러한 공백을 해소하기 위해 본 연구에서는 비전 기반 Taylor cone 형상 지표(꼭지각, 길이, 곡률, 목 직경 등)를 경량·실시간으로 추출하는 파이프라인을 구축하고, 해당 지표를 참조값으로 활용하는 전압 파형 페루프 제어(PID/MPC 호환)를 통해 cone-jet 안정 구간을 자동 유지하는 방안을 제시한다. 아울러 고점도 용액을 대상으로 장시간 안정 토출과 액적 균일도 최적화를 실증하고, 재료·노즐 변경 시 빠른 파형 초기화와 적응을 가능하게 하는 대리모델·소샷 보정 기반 일반화 전략을 구현하며, 센싱-추론-구동 지연을 최소화하는 엣지 통합 아키텍처를 설계하여 산업 라인에서의 적용성을 확보하였다.

3. 제안 알고리즘

본 연구는 고점도 유체의 안정적 미세 분배를 위해 전기 유체역학(EHD) 기반 토출 방식에 비전 지원 제어(Vision-Assisted Control)를 결합하여, 공정 변수 최적화를 달성하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 다음과 같은 절차와 방법을 제안하였다.

3.1 시스템 구성

본 연구에서 구축한 시스템은 크게 EHD 토출부, 비전 센싱부, 그리고 제어부의 세 가지 주요 모듈로 구성되며, 각 모듈은 서로 유기적으로 연동되어 고점도 용액의 안정적이고 정밀한 미세 토출을 가능하게 한다.

우선 EHD 토출부는 고점도 용액을 일정한 유량으로 공급하는 정밀 노즐과 전기장을 형성하는 전극, 그리고 다양한 전압 파형을 인가할 수 있는 고전압 구동 장치로 구성된다. 이 장치는 DC, 펄스, 복합 파형 등 다양한 전기 신호를 생성하여 노즐 끝단에서 형성되는 Taylor cone과 제트 형상을 제어할 수 있도록 설계되었으며, 전기적 파라미터를 실험 조건에 맞게 유연하게 조정할 수 있다.

비전 센싱부는 고속 카메라와 고휘도 광원으로 이루어져 있으며, 노즐 팁에서 발생하는 Taylor cone의 형상 변화와 제트 분사 과정을 마이크로초 단위로 촬영할 수 있다. 이를 통해 토출 중 발생하는 미세한 형상 변화나 불안정성을 실시간으로 감지하고, 영상 데이터를 분석 모듈로 즉시 전송한다.

제어부는 크게 영상 분석 모듈과 파형 제어 모듈로 구성되며, 이들 간의 상호작용 구조는 제어 로직으로 표현할 수 있는데, (1) 영상 입력, (2) 형상 지표 추출, (3) 제어 신호 연산, (4) 전압 파형 적용의 순환 구조로 설계되어, 독자가 제어 로직을 직관적으로 이해할 수 있도록 하였다.

3.2 비전 기반 형상 분석

본 연구의 비전 기반 형상 분석 모듈은 EHD 토출 공정 중 형성되는 Taylor cone과 제트의 미세 형상을 실시간으로

로 계속하여, 제어기의 참조값으로 활용하는 핵심 구성 요소이다. 이 모듈은 영상 획득, 전처리, 형상 특징 추출, 안정성 지표 산출의 네 단계로 구성된다.

3.2.1 영상 획득

본 연구에서는 고점도 유체의 전기 유체 역학(Electrohydrodynamics, EHD) 기반 미세 토출 공정을 정밀하게 계측하고, 제어 알고리즘 설계에 필요한 고해상도 시각 데이터를 확보하기 위해 고속 비전 센싱 환경을 구축하였다. 촬영 장비로는 Basler acA1600-20gc 고속 카메라(해상도 1624×1236 pixel, 1,000~5,000 fps, 촬영 거리 10 cm)를 사용하여 EHD 토출 과정에서 발생하는 Taylor cone 형성, 제트 방출, 액적 분리(droplet detachment) 등의 고속 동적 현상을 시간축 해상도 손실 없이 기록하였다. 또한, 공간 해상도는 최소 2 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ 로 설정하여, 카메라 센서의 각 픽셀이 실제 물리 거리와 정밀하게 매핑되도록 하였다. 이를 통해 Taylor cone의 개구각(opening angle), 곡률 반경(curvature radius), 제트 직경(jet diameter), 및 액적 크기 분포를 정량적으로 분석할 수 있었으며, 이 데이터는 이후 비전 피드백 기반 파형 제어 시스템의 핵심 입력 변수로 활용된다.

조명 환경은 액적과 제트의 경계(edge)를 뚜렷하게 강조하기 위해 역광(backlight) 방식을 기본 조명 모드로 채택하였다. 이를 통해 영상에서 배경과 유체 경계 간의 명암 대비를 극대화하여, 에지 검출(edge detection) 및 형상 추출(shape extraction) 알고리즘의 정확성을 높였다. 그러나 역광 방식만으로는 제트 표면의 세밀한 요철이나 미세 진동(micro-vibration)을 충분히 포착하기 어렵기 때문에, 필요 시 측광(side illumination)을 병행하여 제트 표면의 파동, 불안정성(instability), 미세 주름 패턴 등을 보다 정밀하게 기록하였다.

영상 데이터의 분석 효율성과 처리 속도를 향상시키기 위해, 카메라 입력 영상에서 노즐 팁을 기준으로 상·하 약 2~3 mm 범위를 관심영역(Region of Interest, ROI)으로 지정하였다. 이러한 ROI 설정은 불필요한 배경 영역을 제거하여 프레임당 데이터 크기를 최소화하고, 이미지 처리 알고리즘의 계산 부하를 줄이는 동시에 실시간 분석(real-time analysis)에 필요한 지연(latency)을 감소시켰다. 또한, ROI 기반 분석은 동일한 프레임 속도에서 더 긴 실험 시간을 기록할 수 있도록 하여, 공정 변수 변화에 따른 장기 동역학(long-term dynamics)까지 추적 가능하게 하였다.

결과적으로, 본 촬영 환경 구축을 통해 EHD 토출 공정의 미세 거동을 마이크로미터 수준의 공간 해상도와 밀리초 수준의 시간 해상도로 관찰할 수 있었으며, 이를 기반으로 한 영상 데이터는 파형 설계, 전압 제어, 유량 최적화 등 다양한 공정 제어 전략 개발의 핵심 근거 자료로 활용될 수 있다.

3.2.2 안정성 지표 산출 및 실시간 처리 구조

본 연구에서는 비전 분석 모듈을 통해 추출된 각 특징 값(예: Taylor cone의 꼭지각, 목 직경, 제트 직경 등)을 시간축에서 지속적으로 추적하며, 변동성(표준편차)과 장기 추세 분석을 수행하여 cone-jet 모드의 안정성을 정량적으로 평가하였다. 특히, 특정 시간 구간 동안 꼭지각과 목 직경의 변화량이 사전에 정의한 허용 범위 이내에 머무를 경우 시스템은 안정 상태로 판정하며, 변화량이 임계값을 초과하면 제어부에서 전압 크기, 파형 형태, 또는 공급 유량을 자동으로 조정하여 안정성을 회복하도록 하였다. 이러한 페루프 제어를 실시간으로 구현하기 위해, 영상 분석 단계에서 관심영역(ROI) 기반의 제한 연산과 경량화된 에지 검출 알고리즘을 적용함으로써 프레임당 처리 시간을 1~2 ms 이내로 유지하였다. 이를 통해 전체 제어 시스템의 응답 지연을 최소화하였으며, 고속 토출 환경에서도 실시간 피드백이 가능하도록 하였다. 분석된 결과 데이터는 즉시 제어부로 전송되어 전압 파형 및 유량 제어기의 참조값(reference value)으로 활용되며, 이를 기반으로 한 동적 파형 조절은 토출 품질과 반복 정밀도를 향상시킨다. 또한, 조명 불균일, 초점 이탈, 영상 노이즈 증가와 같은 환경적 요인으로 인해 분석 신뢰도가 낮다고 판단되는 경우, 제어 시스템은 신뢰도 기반 가중치 조정 메커니즘을 적용하여 반응 속도를 자동으로 감소시키고, 이를 통해 불필요한 제어 오동작을 예방하였다. 이러한 통합적인 비전-제어 연계 설계는 고점도 유체의 EHD 기반 미세 토출 공정에서 장시간 안정적 운영을 가능하게 하는 핵심 요소로 작용한다.

3.2.3 모드 판별 단계

본 연구에서는 EHD 토출 공정의 안정성을 유지하고, 목표 형상을 지속적으로 구현하기 위해 모드 판별 단계와 공정 변수 제어 단계를 결합한 페루프 구조를 적용하였다.

EHD 기반 토출 공정에서는 노즐 팁에서의 유체 거동 특성에 따라 여러 가지 동작 모드가 나타나며, 본 연구에서는 이를 Drip 모드, Micro-drip 모드, Cone-jet 모드, 그리고 Electro spray 모드의 네 가지로 분류하고, 비전 분석 모듈을 활용하여 실시간으로 판별하는 방안을 제안하였다. Drip 모드는 전기장이 충분히 형성되지 않아 액적이 전기력보다는 중력에 의해 떨어지는 상태로, 액적 크기가 크고 토출 주기가 불규칙하다는 특징을 가진다. Micro-drip 모드에서는 비교적 작은 액적이 주기적으로 방출되지만, 안정적인 Taylor cone이 형성되지 않거나 제트가 연속적으로 이어지지 않아 공정 안정성이 낮다. 반면, Cone-jet 모드는 이상적인 상태로, 일정한 형태의 Taylor cone이 유지되면서 직경이 균일한 제트가 지속적으로 토출되어 고정밀 패턴닝이 가능하다. Electro spray 모드는 과도한 전기장 인가로 인해 제트가 미세한 액적 형태로 분해되어 분무 형태로 방출되는 상태를 의미한다. 본 연구에서 제안한 모드 판별 알고리즘은 세 가지 핵심 특징 지표를 기반으로 작동한다. 첫째, 꼭지각(apex angle)은 Cone-jet 모드에서 일정 범위 내에서 안정적으로 유지되지만, Drip이나 Electro spray 모드에서는

급격하고 불규칙한 변화를 나타낸다. 둘째, 목 직경 변화율(neck diameter variation rate)은 안정 모드에서는 변동 폭이 작으나, 불안정 모드에서는 주기적이거나 불규칙하게 크게 변동하는 양상을 보인다. 셋째, 제트 직경과 진동 주파수 분석을 통해 Cone-jet 모드에서는 제트 직경이 거의 일정하고 저주파 성분이 우세한 반면, Electrospray 모드에서는 고주파 진동 성분이 증가하는 특성을 식별하였다. 이러한 특징 지표들의 실시간 분석을 통해 시스템은 모드 전환 시점을 신속히 감지하고, 제어부에서 인가 전압, 파형, 공급 유량 등을 즉시 조정함으로써 안정적인 Cone-jet 상태를 유지할 수 있도록 설계하였다.

3.2.4 공정 변수 제어 단계

모드 판별 결과와 형상 지표는 실시간으로 제어부에 전달되어, 전압 파형 및 유량과 같은 핵심 공정 변수를 즉각적으로 조정함으로써 안정적인 EHD 토출을 유지한다. 제어 방식은 크게 외루프(geometry control)와 내루프(waveform control)로 구분된다. 외루프 제어에서는 안정적인 cone-jet 형상을 나타내는 꼭지각, cone 길이, neck 직경 등의 목표 범위를 사전에 정의하고, 실시간 측정값과 목표값의 차이를 오차로 계산하여 그 크기에 비례해 전압 진폭, 주파수, 듀티비 등을 조정한다. 또한, 점도 변화나 온도 변화와 같은 외란 발생 시 제어기의 계인을 실시간으로 조정하여 과도한 보정이나 응답 지연을 방지함으로써 공정 안정성을 높인다. 반면, 내루프 제어는 파형의 세부 특성을 정밀하게 조정하는 역할을 수행한다. 구체적으로, 전압 파형의 상승·하강 속도, 오버슈트, 펄스 폭 등을 최적화하여 cone 형성 시간을 단축하고 위핑(whipping) 현상을 억제하며, 전압 증폭기와 파형 발생기가 밀리초 단위로 파라미터를 갱신하여 형상 변화에 즉각 대응할 수 있도록 한다. 이때 과전압이나 과전류로 인한 방전을 방지하기 위해 안전 한계를 설정하고, 이를 초과하지 않도록 제한 조건을 반영한다. 더불어 시스템은 다양한 예외 상황에 대응할 수 있도록 설계되었다. 예를 들어, 영상 분석에서 cone의 급격한 수축이 감지되거나 전류 센싱에서 순간적인 피크가 발생하면 방전이 일어난 것으로 판단하여 전압을 즉시 감쇠시키고 안정 모드로 복귀시킨다. 또한, neck 직경의 지속적 증가와 제트 직경의 불규칙 변화를 동시에 감지하면 노즐 막힘 가능성을 판단하여 자동으로 purge(세정) 시퀀스를 실행하며, 재료나 노즐이 변경된 경우에는 소량의 초기 시험 데이터를 바탕으로 최적 전압 및 유량 조건을 재탐색하여 초기 세팅 시간을 최소화한다. 이러한 다계층 제어 구조는 고점도 유체의 EHD 기반 미세 토출 공정에서 형상 안정성과 공정 신뢰성을 동시에 확보하는 데 중요한 역할을 한다.

3.2.5 최적화 전략

이와 같은 모드 판별과 공정 변수 제어 구조의 결합을 통해, 본 연구에서 개발한 시스템은 고점도 유체 환경에서도 장시간

에 걸쳐 안정적인 cone-jet 모드를 지속적으로 유지하며, 토출되는 액적의 크기와 형태에서 높은 균일성을 확보할 수 있었다. 특히, 외부 온도 변화, 점도 변화, 전기적 노이즈 등 다양한 외란 상황에서도 제어부가 실시간 피드백을 기반으로 신속하게 전압 파형과 유량 조건을 조정함으로써, 불안정한 모드로의 전이 없이 목표 형상을 복원하는 능력을 발휘하였다. 또한, 재료의 물성 변화나 노즐 교체와 같은 환경 변화에도 초기 시험 데이터를 활용한 자동 재조정 기능을 통해 최적 조건을 빠르게 재탐색함으로써 공정 중단 시간을 최소화하였다. 이러한 특성은 EHD 기반 미세 토출 기술을 실제 산업 현장에 적용할 때, 생산 라인의 연속 운전과 품질 관리에 필수적인 안정성과 신뢰성을 보장한다는 점에서 매우 큰 의미를 가진다.

4. 실험 결과

4.1 전압 변화에 따른 Taylor cone 형상 및 액적 크기 분석

고속 비전 카메라로 촬영된 영상을 OpenCV 기반의 영상 처리 알고리즘으로 분석하여 Taylor cone의 윤곽선을 정밀하게 추출하고, 이를 통해 각도를 산출하였다. 전압은 1,000V에서 7,000V까지 1,000V 단위로 단계적으로 증가시키며 실험을 수행하였다. 그 결과, 1,000V에서는 전기장이 충분히 형성되지 않아 cone 형성이 전혀 이루어지지 않았으며, 2,000V에서는 비대칭적인 cone이 나타나고 액적 크기 편차가 크게 관찰되었다. 반면, 4,000V에서 5,000V 구간에서는 Taylor cone 각도가 약 80°에서 90° 범위를 안정적으로 유지하며, 액적 직경의 표준편차가 최소값($\sigma/\mu \approx 0.24$)을 기록하여 가장 균일한 토출 특성을 보였다. 그러나 6,000V 이상의 전압 영역에서는 cone 각도가 110° 이상으로 증가함과 동시에 토출 직경이 작아졌지만, 이와 반대로 액적의 불균일성이 다시 증가하는 경향이 나타났다. 이러한 결과는 EHD 기반 토출에서 최적 cone-jet 형성을 위한 전압 범위가 존재하며, 과도한 전압 인가는 오히려 액적 품질 저하를 초래할 수 있음을 보여준다.

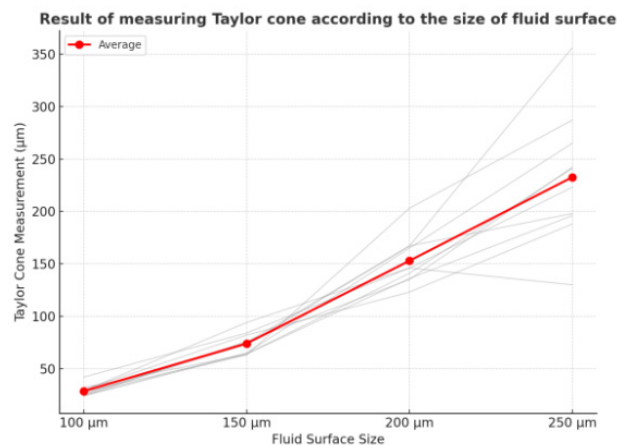


Figure 3. Result of measuring Taylor cone according to the size of fluid surface

4.2 액체 곡면 크기에 따른 토출 특성

액체 곡면 크기를 100, 150, 200, 250 μm 로 단계적으로 변경하여 실험한 결과, 곡면 크기가 커질수록 전기장 분포와 모세관 압력의 상호 작용에 따라 Taylor cone의 각도는 점진적으로 감소하고, cone의 길이는 상대적으로 증가하는 경향이 나타났다. 특히 100~150 μm 범위에서는 공급 유량이 비교적 적어 액적 직경이 감소하고 토출되는 액적의 크기 편차가 줄어들어 균일성이 향상되는 효과를 보였다. 그러나 곡면 크기가 200 μm 이상으로 커지면 공급 유량이 급격히 증가하여 액적 직경이 다시 커졌으며, 과도한 유량 유입으로 인해 초기 35회의 토출 과정에서 cone 형상이 불안정하게 흔들리거나 찌그러지는 현상이 관찰되었다. 이러한 결과는 곡면 크기가 전기수력학(EHD) 기반 미세 토출 공정에서 cone 형상과 액적 품질에 직접적인 영향을 미치며, 일정 범위를 넘어설 경우 안정적인 cone-jet 형성을 방해할 수 있음을 시사한다.

4.3 전극 내경 변화에 따른 토출 위치 안정성

전극 내경을 4, 6, 8, 10mm로 순차적으로 변경하여 실험한 결과, 전극 내경이 작을수록 전기장 분포의 비대칭성이 커져 cone 중심이 전극 외벽 방향으로 편향되는 현상이 뚜렷하게 나타났으며, 특히 4~6mm 구간에서는 이러한 편향이 지속적으로 발생하여 균일한 토출을 유지하기 어려웠다. 전극 내경이 8mm로 확장된 경우, cone 중심이 간헐적으로 회복되었으나 여전히 비대칭 현상이 관찰되었으며, 토출되는 액적의 직경에도 변동이 있었다. 반면, 전극 내경이 10mm일 때는 전기장이 보다 균일하게 형성되어 cone 중심이 안정적으로 유지되었고, 토출 직경의 표준편차가 모든 조건 중 가장 낮게 측정되어 액적 균일성이 가장 우수한 상태를 보였다. 이러한 결과는 전극 내경이 EHD 기반 미세 토출 공정에서 전기장 균일성과 cone 안정성 확보에 중요한 설계 변수임을 의미한다.

4.4 전압 파형별 액적 직경 비교

Function Generator를 이용하여 Multi sine, Multi DC, Multi DC+Sine, Multi square의 네 가지 파형을 각각 적용한 결과, 파형 특성에 따라 액적 직경과 균일성에서 뚜렷한 차이가 나타났다. Multi sine 파형에서는 평균 직경이 약 25 μm 로 측정되었으며, 변동계수(σ/μ)는 0.27로 중간 수준의 균일성을 보였다. Multi DC 파형을 적용한 경우, 평균 직경이 약 16 μm 로 감소하였고 변동계수도 0.25로 소폭 개선되어 보다 안정적인 토출이 가능했다. 특히 Multi DC+Sine 파형(DC 4 kV, Sine 주파수 2 kHz, 진폭 ± 0.5 kV, duty ratio 60%)에서는 평균 직경이 약 9 μm 로 가장 작게 나타났으며 변동계수 역시 0.22로 최소값을 기록하여 직경 감소와 균일성 향상 측면에서 최적의 성능을 보였다. 반면, Multi square 파형은 액적 직경이 50~1,000 μm 범위에서 불규칙하게 변화하며 변동계수도 0.45로 높게 나타나,

액적 크기와 균일성이 모두 불안정한 결과를 보였다. 이러한 실험 결과는 파형 형태가 EHD 기반 미세 토출 공정에서 액적 형성과 안정성에 결정적인 영향을 미친다는 점을 명확히 보여준다.

4.5 비전 피드백 제어 적용 효과

비전 기반 피드백 제어를 적용하지 않은 baseline(단일 DC 파형, 제어 미적용 조건)에서는 직경 편차가 평균 대비 약 32%였으나, 동일 조건에서 Vision-Feedback 제어를 적용한 경우 약 18% 감소하였다. 따라서 baseline 대비 개선 효과가 명확히 입증되었다. 이러한 제어 방식은 액적 형상의 안정화뿐만 아니라 전체 공정의 신뢰성을 향상시켰으며, 결과적으로 전체 토출 성공률이 기존 92%에서 97%로 상승하였다. 이는 비전 기반 피드백 제어가 초기 불안정 구간을 효과적으로 보정하고, 고점도 유체의 EHD 기반 미세 토출 공정에서 장기적인 안정성과 균일성을 확보하는 데 중요한 역할을 한다는 것을 입증한다.

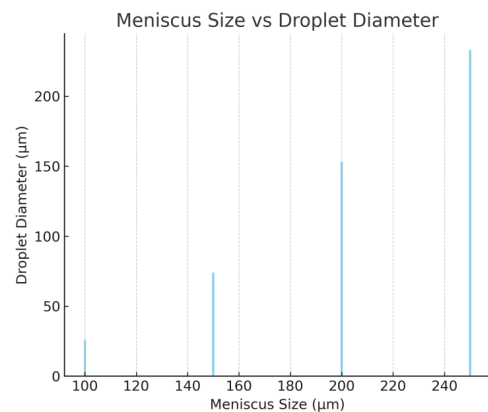


Figure 4. Effect of meniscus size on droplet diameter

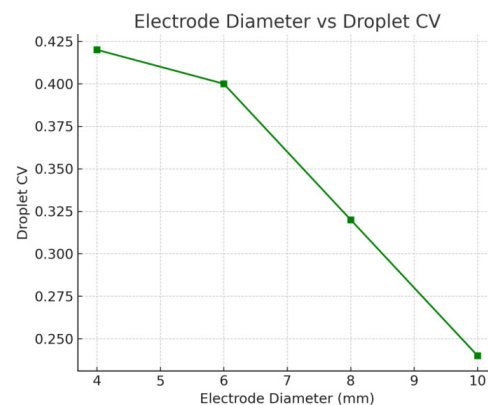


Figure 5. Effect of electrode diameter on droplet coefficient of variation

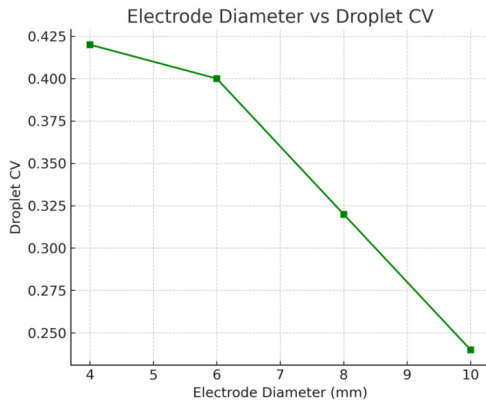


Figure 6. Effect of electrode diameter on droplet coefficient of variation

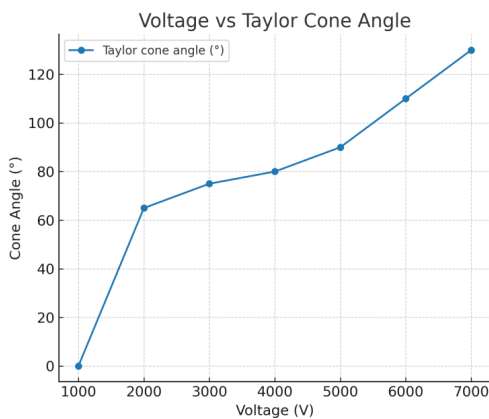


Figure 7. Effect of voltage on cone angle

5. 결론

본 연구에서는 전기수력학(EHD) 기반 미세 토출 공정에 컴퓨터 비전 기반 형상 분석과 실시간 파형 제어 알고리즘을 적용하여 고점도 용액의 안정적인 고균일한 토출 조건을 도출하였다. Basler 고속 카메라와 OpenCV 기반 영상 처리 알고리즘을 이용해 Taylor cone 각도 및 액적 직경을 실시간으로 측정하였고, NI-DAQ 기반 제어 모듈을 통해 전압 파형을 자동 조정하는 피드백 제어 시스템을 구현하였다. 실험 결과, 전극 내경 10 mm, 전극 간격 2 mm, 인가 전압 4~5 kV, 액체 곡면 크기 150 μm , Multi DC + Sine pulse 파형이 가장 우수한 균일성과 최소 액적 직경(9 μm)을 나타냈다. 비전 피드백 제어 적용 시 토출 직경의 표준편차(CV)가 약 18% 감소하였으며, 초기 토출 불안정 현상도 완화되었다. 이러한 결과는 마이크로 LED 픽셀 배열 형성, 고정밀 바이오프린팅, 반도체 칩 패키징 공정과 같은 산업 현장에 직접적으로 적용될 수 있다. 특히 마이크로 LED 제조에서 픽셀 단위의 균일한 토출은 생산 수율 향상과 직결되며, 바이오프린팅에서는 세포 배치 정확도를 크게 개선할 수 있다. 향후 연구에서는 CNN 기반 형상 예측 모델을 통해 실시간으로 액적 직경을 추정하고, 예측값을 PID/MPC 제어기에 반영하여 자

동 보정하는 시나리오를 구체적으로 제시한다. 예컨대, 덩러닝 모델이 cone 형상의 변화를 조기에 탐지하고, 이를 즉각적으로 전압 파형 조정에 반영함으로써 완전 자율형 제어 구조를 구현할 수 있다. 또한 (1) 고속 응답성 확보, (2) 최소 액적 직경 한계 극복, (3) 다양한 점탄성 용액 적용 가능성 검증을 연구 과제로 제시한다. 이를 통해 본 연구의 한계를 보완하고 산업적 확장성을 강화할 계획이다.

참고문헌

- [1] Zhang, X., Lies, B., Lyu, H., & Qin, H. (2019). In-situ monitoring of electrohydrodynamic inkjet printing via scalar diffraction for printed droplets. *Journal of Manufacturing Systems*, 53, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.08.001>
- [2] Liu, Y., Chen, Y., Yan, H., Chen, J., Chen, H., Li, S., ... & Zheng, G. (2025). High-stability electrohydrodynamic inkjet printing based on double closed-loop fuzzy control. *Scientific Reports*, 15, 25794. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-11791-4>
- [3] Singh, A., Srivastava, R., & Bahga, S. (2022). Regimes of steady jetting in electrohydrodynamic jet printing. *Physical Review Fluids*, 7(6). <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.7.063701>
- [4] Can, T., Nguyen, T. C., & Choi, W. (2019). Patterning of high-viscosity silver paste by an electrohydrodynamic jet printer for electronic devices. *Scientific Reports*, 9(1), 9180. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45504-5>
- [5] Bi, S., Wang, R., Han, X., Wang, Y., Tan, D., Shi, B., ... & Asare-Yeboah, Y. (2023). Recent Progress in Electrohydrodynamic Jet Printing for Printed Electronics: From 0D to 3D Materials. *Coatings*, 13(7), 1150. <https://doi.org/10.3390/coatings13071150>
- [6] Duan, Y., Yang, W., Wang, Q., Sun, Z., Guo, H., & Yin, Z. (2024). High-density, high-frequency and large-scale electrohydrodynamic drop-on-demand jetting via a protruding polymer-based printhead design. *Microsystems & Nanoengineering*, 10(1), 163. <https://doi.org/10.1038/s41378-024-00786-2>
- [7] Yin, Z., Wang, D., Guo, Y., Zhao, Z., Li, L., Chen, W., & Duan, Y. (2024). Electrohydrodynamic printing for high resolution patterning of flexible electronics toward industrial applications. *InfoMat*, 6 (2), e12505. <https://doi.org/10.1002/inf2.12505>
- [8] Oikonomou, A., Loutas, T., Fan, D., Garmulewicz, A., Nounesis, G., Chaudhuri, S., & Tzourlomos, F. (2023). Physics-informed Bayesian learning of electrohydrodynamic polymer jet printing dynamics. *Communications Engineering*, 2(1), 20. <https://doi.org/10.1038/s44172-023-00069-0>
- [9] Farjam, N., Spiegel, I. A., & Barton, K. (2022). High-fidelity modeling and validation of Electrohydrodynamic Jet Printing. *Materialia*, 26, 101578. <https://doi.org/10.1016/j.mta.2022.101578>

- [10] Lu, Y., Zhong, S., Chong, K., Yang, Y., Yue, T., Zhang, Q., & Li, L. (2023). Numerical study on the effects of fluid properties in electrohydrodynamic pulsating jet under constant voltage. *arXiv:2309.06277*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.06277>
- [11] Lee, D., Choi, M., Choi, S., & Hong, M. (2023). A Study on Respiratory Image Pre-processing and Respiration Tracking through Thermal Imaging Camera. *Journal of the Korean Association of Computer Education - Conference Proceedings*, <https://doi.org/10.32431/kace.2023.26.6.008>
- [12] Kim, S. (2023). Color Image Interpolation Technique based on Residual CNN. *Journal of the Korean Association of Computer Education*, 26(6), 89-95. <https://doi.org/10.32431/kace.2023.26.6.008>



강동성

- 2013년 한국공학대학교 기계설계(공학사)
- 2015년 인하대학교 기계공학 (공학석사)
- 2018년 인하대학교 기계공학 (공학박사)
- 2019년~현재 (주)오엘테크 부설연구소 연구소장 (CTO)
- 2022년~현재 인하공업전문대학 기계설계공학과 겸임교수

✚ 관심분야: 반도체 패키징, 인공지능 시스템 설계, 스마트팩토리

✉ eastcastle78@nate.com