

인공지능 영상분석 피드백 제어를 활용한 휴대용 공기펌프 기반 미세유동 제어기 개발

Development of a Portable Air Pump-based Microflow Controller Using AI Video Analysis Feedback Control

박우현^{1,2}, 김민석^{1,2,#}
Woohyun Park^{1,2}, and Minseok Kim^{1,2,#}

¹ 금오공과대학교 기계시스템공학과 (Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology)
² 금오공과대학교 항공기계전자융합공학과 (Department of Aeronautics, Mechanical and Electronic Convergence Engineering, Kumoh National Institute of Technology)
Corresponding Author / E-mail: mkim@kumoh.ac.kr
ORCID: 000-0003-4539-4309

KEYWORDS: Microfluidics (미세유체공학), Arduino uno (아두이노 우노), Artificial intelligence (인공지능), Portable air pump (휴대용 공기펌프), Video analysis feedback (영상분석 피드백)

Microfluidics allows for precise manipulation of small volumes of analytical solutions in diverse applications, including disease diagnostics, drug efficacy testing, chemical analysis, and water quality monitoring. Among these diverse applications, one of the most critical aspects is the precise and programmable control of flow within microfluidic control devices. However, microfluidic experiments that employ pressure control via a gas tank may encounter restricted mobility. To address these challenges, we developed an air pump feedback control system utilizing artificial intelligence image analysis and devised a method to enhance portability. In this paper, we utilized a commercially available portable pump to achieve the desired pressure and subsequently cease operation. In addressing the challenge of sustaining prolonged pressure, we implemented a strategy wherein the dimensions of the pressure vessel were modified, accompanied by iterative pump activations, thereby ensuring the sustained maintenance of pressure over time. The evaluation of the flow controller developed in this study involves conducting a comparative flow analysis with established pneumatic flow controllers. Furthermore, we employed artificial intelligence image analysis methods to automate the operation of iterative pumps. In conclusion, we anticipate that the developed portable microfluidic control device will lead to innovative advancements in modern technology and healthcare through its potential applications.

Manuscript received: August 16, 2024 / Revised: October 10, 2024 / Accepted: October 10, 2024

1. 서론

랩온어칩(Lab-on-a-chip, LOC)은 연구실 수준에서 사용되는 미세 분석 장치로[1], 화학 및 생화학 물질의 분석[2]을 위한 다양한 과정을 마이크로 채널 내에서 수행할 수 있도록 설계되었으며, 작은 용량의 시료를 정밀한 처리[3] 및 정확한 분석을[4] 할 수 있다. 최근 연구에서는 다양한 시료 주입 및 선택적 시료 주입의 중요성이 부각되어 있으며, 이에 따라 미세 유동 제어 시스템의 발전이 필수적이다[5]. 미세 유동 제어 시스템은 미세

액적 생성[6], 세포 조작[7], 화학 및 생체 분자 감지[8], 샘플 처리[9] 등 다양한 응용 분야에 활용된다. 이를 위해 마이크로 단위의 채널에 원하는 유량으로 유체를 분사할 수 있는 미세 유동 제어 시스템이 필요하다[10]. 현재는 다중 유체를 동시에 마이크로 단위의 채널에 공급할 수 있는 미세 유동 제어 시스템이 개발되었지만, 작은 실험실에서의 사용에는 여전히 높은 비용이 요구된다[11].

주사기 펌프는 사용자가 원하는 유량을 정의할 수 있고, 마이크로 단위의 채널에 적절한 압력 강하를 적용할 수 있어 대체

재로써 미세 유동 제어 방법으로 사용되어왔다[12]. 그러나 실린지 펌프는 여러 구조적 문제로 제한된 분사량[13], 느린 유체 응답 시간[14], 맥동성 유체 흐름[15] 등의 문제가 있고 여러 개의 주입구를 사용하는 채널의 경우 여러 개의 실린지 펌프가 필요하다는 한계도 존재한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 정압 시스템의 새로운 유동 제어 방법이 제안되었다[16]. 이 방법은 일정한 압력과 채널의 형상을 이용하여 유량을 결정하는 방식으로, 사용자가 원하는 압력과 채널의 형상을 설정하여 유체 흐름을 제어할 수 있다. 이는 유체의 흐름을 정확하게 전달할 수 있지만 현재로서는 정압 시스템의 한계로 인해 공압 시스템이 갖춰져 있는 곳에서만 사용할 수 있다[17,18].

본 논문은 실험실에서 높은 정확성과 경제적인 미세 유동 제어가 가능하고 주사기 펌프의 문제를 완화한 새로운 제어기를 제안한다. 또한, 실험실 내 이동 제한 문제[19]를 해결하기 위해 인공지능 이미지 분석을 활용하여 공기 펌프를 자동으로 제어하는 장치를 소개한다. 이 장치는 무거운 가스 용기를 대신하여 소형 펌프와 채널 형상을 이용하여 유량을 조절할 수 있어 외부에서 자동화된 미세 유체 실험이 가능하다. 본 논문에서는 먼저 휴대용 미세 유동 제어기의 제작과 작동 방법을 소개한다. 그 후, 본 논문에서 개발한 미세 유동 제어기의 압력 유지 시스템의 단점을 극복하는 방법을 소개하고 기존의 미세 유동 제어기와 비교하여 정확한 유량 유지 시스템을 나타낼 수 있음을 확인한다. 마지막으로 인공지능 이미지 분석 장치를 활용하여 공병의 압력을 자동으로 유지할 수 있는 기능을 확인한다. 또한 압력과 채널 길이에 대한 유량 선도를 제시하여 휴대용 미세 유동 제어기의 성능을 검증한다.

2. 방법

2.1 미세 유동 제어

미세 유체학에서 흐름 역학은 중력[18,20], 전기장[21,22], 자기장[23,24] 및 부력[25,26]과 같은 힘의 영향을 받는다. 일반적인 접근 방식 중 하나는 정상 표면 응력인 압력을 활용하여 미세 흐름을 생성한다. 압력 구동 흐름에서는 유체가 채워진 미세 유체 채널 입구에 압력을 가하고 길이에 따라 압력 구배를 설정하여 유체 이동을 촉진한다. 체적 유량은 일정한 압력을 유지하거나 일정한 유량을 유지하여 조절할 수 있다. 이 원리를 기반으로 자주 사용되는 방법은 주사기 펌프이고 이는 자동으로 압력을 조정하여 일정한 유량을 유지한다. 이 접근법은 유량이 채널 구조와 독립적으로 제어할 수 있어 미세 유체 응용 분야에 매우 유용하다. 하지만 주사기 펌프의 경우 낮은 유량에서 흐름 진동에 취약하여 마이크로 단위의 큰 오차가 발생할 수 있다. 이를 해결하는 방법으로, 순 유량을 유도하기 위해 마이크로 채널에 고정된 압력을 가하고 일정한 압력을 사용하여 흐름을 생성할 수 있다. 이는 빠른 응답 시간, 높은 안정성 및 맥동 없는 흐름, 많은 양의 유체를 처리할 수 있는 이점이 있다. 하지만

유량을 정밀하게 제어해야 하는 응용 분야에서 사용하기 어렵고 공압 시스템이 구축이 된 제한적인 공간에서만 사용이 가능하다는 단점이 있지만 유량 제어는 출구에서 유체를 포착하고 다양한 압력 값에 대한 시간의 함수로 수집된 부피를 계산하는 방법으로 특정 미세 유체 장치에 대한 압력 곡선을 얻을 수 있어 제어가 가능하다는 장점 또한 존재한다.

2.2 공기 펌프 모듈을 사용한 미세 유동 제어기

본 논문에서는 실험실에서 사용하는 공압 기반 미세 유동 제어 장치에서 자주 발생하는 공간적 제약을 해결하기 위해 쉽게 사용할 수 있는 공기 펌프 모듈을 사용하는 휴대용 미세 유동 제어기를 고안했다. 공기펌프의 최대 이점은 자체 건전지로 작동하기 때문에 전력 공급에 상관없이 휴대하며 실험을 진행할 수 있다는 점이다. 공기 펌프의 작동 압력 단위는 bar와 psi 두 가지이지만 추후 실험에서 비교 대상인 기존의 공압 미세 유동 제어 장치와의 비교에도 용이하기 때문에 psi 단위를 사용했다. 또한 공기 펌프의 전면 LED에 압력 수치가 표시되어 추가로 압력계를 설치할 필요가 없다. 또한 가압 시 설정 압력에 도달하게 되면 자동으로 가압이 중단되는 원리를 사용하여 장치를 제작했다. 하지만 센서 정밀도가 ± 2 psi이고 표시할 수 있는 압력의 최소 단위가 1이기 때문에 현재 압력의 정확한 값을 알 수 없고 근사한 값만 얻을 수 있다. 또한 펌프가 최소 1분 이상 작동을 해야 하는 타이머처럼 부피가 큰 물체에 가압을 하도록 설계되어 있어 500 ml와 같은 작은 유리병에 갑작스러운 압력 상승으로 오버 슈트가 발생한다. 이것은 펌프의 한계이기 때문에 유리병 크기 조절 및 압력 배출 시스템 구축을 통해 이러한 문제를 해결했다(Fig. 1).

2.3 웹캠과 터치블 머신을 활용한 압력 자동화 시스템

펌프의 단점을 보완하면서 동시에 자동화할 수 있는 방법으로 아두이노, 웹캠, 터치블 머신을 사용했다. 터치블 머신은 펌프를 재가동하기 위한 장치이다. 이는 병 내부의 압력이 낮아지는 것을 웹캠을 통해 감지하여, 서보모터를 작동시키고 그 결과 공기 펌프의 스위치가 눌러 펌프가 다시 작동된다. 전체적인 자동화 시스템 구성은 다음과 같다. 웹캠에서 받아온 펌프의 LED 창에 띄워진 유리병 내부의 압력 상태를 터치블 머신에서 처리하여 데이터를 전송하고, 아두이노에서 펌프의 조작부와 연결된 서보 모터와 유리병 반대편에 연결된 솔레노이드 밸브를 조작하여 유리병 내부의 압력을 조절한다. 원하는 압력값에 맞추기 위해 펌프의 오버슈트를 고려하여 펌프의 LED 창에 이미지를 학습시킨 뒤 p5.js 프로그램으로 터치블 머신의 학습 데이터를 클라우드 서버 링크로 넘겨 아두이노와 연동시켜준다. 아두이노는 압력 강하에 사용되는 솔레노이드 밸브와 펌프의 가압버튼을 눌러주는 서보 모터를 작동시켜 지속적으로 유체가 들어있는 병에 일정한 공압을 유지하도록 도와준다. 이때 증류수가 외부로 이동할 수 있는 관을 연결하면 병 내부에 잔류해 있는 공압에 의하여 증류수를 외부로 밀어내게 된다. 외부로 밀려난

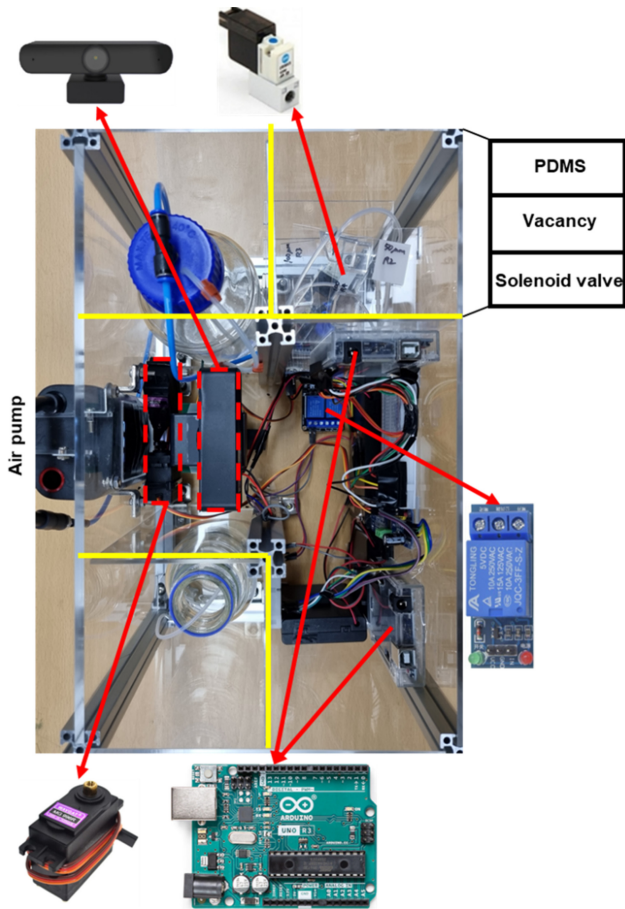


Fig. 1 Appearance of a microfluidic controller utilizing a portable air pump

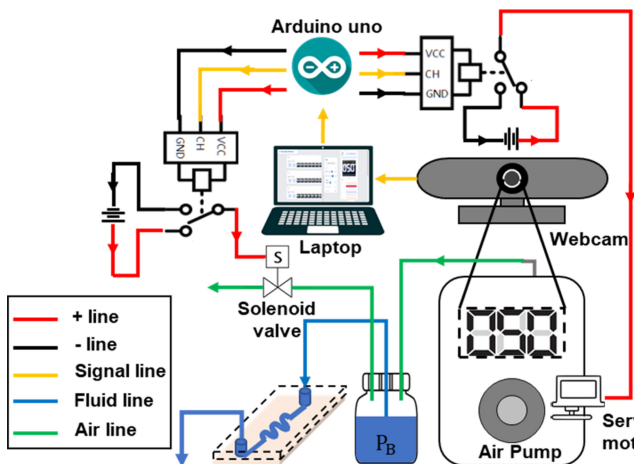


Fig. 2 Schematic of a microfluidic controller utilizing a portable air pump

증류수는 마이크로 단위의 폭과 높이를 가지고 있는 미세 유체 채널에 연결하면, 미세 유동을 생성할 수 있다. 결론적으로 병 내부에 잔류해 있는 압력을 조절하면 병 내부의 압력은 변하고, 미세 유체 채널에 유입되는 증류수의 유량 및 유속을 조절할 수 있다(Fig.2).

2.4 PDMS 기반 미세 유체 채널 제작

미세 유체 장치는 포토리소그래피(Photolithography)를 이용해 제작했다. 간단히 설명하자면, 레이어를 만들기 위해 감광액(SU-8 2025, MicroChem)을 실리콘 웨이퍼(Unisill, Seoul, South Korea)에 레이어(25 μm)를 스핀 코팅 시킨 후 열을 가한다. 포토 마스크(Microtech, Gyeonggi-do, Korea)와 마스크얼라이너(MDA-60MS, MidasSystem)를 사용해 자외선에 노출시킨다. 노출되지 않은 감광액을 제거하기 위해 현상액(SU-8 Developer, Kayaku Advanced Materials)에 웨이퍼를 담그면 미세 유체 채널 몰드가 완성된다. 이어서 미세 유체 채널 몰드 표면에 실레인(Silane, Sigma-aldrich)를 사용해 표면을 코팅한다. 이후, 미세 유체 채널을 만들기 위해서 마스터 몰드에 PDMS (Poly Dimethyl Siloxane, Sylgrad 184, Dow Corning)를 도포하고 60°C에서 4시간동안 경화시킨다. 경화된 PDMS를 마스터 몰드에서 분리한 후, 분리된 PDMS와 슬라이드 글라스에 O2 50 sccm과 50 W에서 30초간 플라즈마 처리(Cute-MP, Femto Science)를 부착하면 미세 유체 채널이 완성된다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 병 크기 변경에 의한 공기 펌프 모듈의 압력 평가

본 논문에서는 차량 타이어와 같이 크기가 큰 물체에 압력을 가하는 작업에 맞춰진 공기 펌프 모듈을 사용했다. 이 모듈은 압력을 측정하는 센서가 부착되어 있어 병의 압력을 측정할 수 있고 지정된 압력 수준을 생성하고 유지하는 주요 목적을 수행하지만 고려해야 할 제한 사항이 존재한다. 이는 부피가 큰 품목에 대한 의도된 적용으로 인해 센서 정밀도가 본질적으로 타협된다는 것이다. 또한 펌프는 원하는 압력에 도달하고 작동을 중단하는 주요 목적을 달성하지만 장기간에 걸쳐 지속적인 압력을 유지한다는 측면에서 부족하다. 이러한 단점은 일관된 압력 유지가 가장 중요한 공압 유동 제어기에 사용하기에는 부적합하다. 따라서 공압 유지 관리 분야에서 휴대용 펌프의 효율성을 극대화하려면 추가 조치가 필수적이라는 것은 분명하다.

본 논문에서는 100과 500 ml 빈 병에 에어펌프를 이용하여 가압하는 실험을 진행하였고, 이후 압력 감소율을 모니터링했다. 일관성을 보장하기 위해 공기 펌프는 실험 전반에 걸쳐 30 psi의 압력을 유지하도록 설정했다. 실험 결과 눈에 띄는 추세를 보여주었다. 100 ml 병 내의 압력은 4분마다 1 psi씩 꾸준히 감소하는 반면, 더 큰 500 ml 병은 압력이 20분마다 1 psi씩 감소하면서 보다 점진적인 감소를 보이는 것을 관찰했다. 이러한 뚜렷한 대조는 압력 감소 속도를 결정하는 데 있어 병 크기가 중요한 역할을 수행함을 알 수 있다. 이는 펌프를 향하는 지속적인 공기 누출에도 불구하고 압력은 상대적으로 느린 속도로 감소한다는 점을 주목할 만하다. 이 현상은 펌프로 일정한 양의 공기가 누출이 되기 때문에 상대적으로 큰 병의 경우 작은 공병보다 많은 양의 공기가 배출되어야 압력이 감소하기 때문에

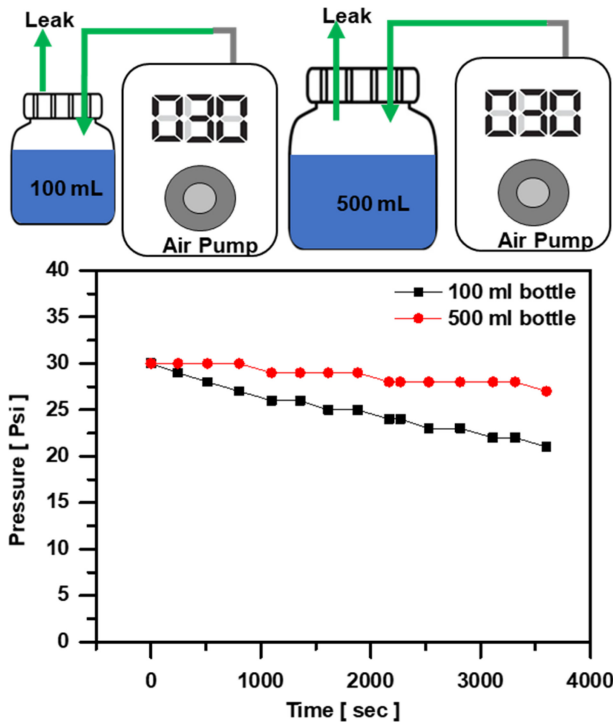


Fig. 3 Pressure maintenance experiment method and results based on bottle size

보다 느린 압력 감소가 일어나는 것으로 확인된다. 결론적으로, 병의 크기를 늘리면 일정 시간 동안 특정 압력 수준을 효과적으로 유지할 수 있다(Fig. 3).

다양한 조건에서 압력 유지 여부의 평가를 하기 위해 병 크기를 500 ml로 표준화하고 다양한 펌프 압력으로 실험을 수행했다. 이를 통해 시간이 지나도 공병의 압력 수준을 유지할 수 있는지 평가했다. 실험 결과 최대 20 psi의 압력에서 빈 병이 한 시간 이상 압력을 유지하여 지속적인 압력 유지 능력을 보여주는 것을 확인했다. 그러나 공병의 압력이 증가함에 따라 압력 유지 시간이 점차 감소하는 것을 확인했다. 구체적으로 30-40 psi에서는 압력이 20분동안 유지된 반면, 50 psi에서는 불과 10분으로 떨어졌다. 이러한 추세는 압력이 상승함에 따라 펌프로 공기 누출 속도가 가속화되어 시간이 지남에 따라 압력을 유지하는 병의 능력이 감소한다. 결론적으로, 병 크기를 늘리면 일시적으로 압력 유지 기간이 연장될 수 있지만 병 크기 조정만으로는 장기간 높은 압력 수준을 유지하는 것이 불가능하다는 것은 분명하다. 그래서 장기간 원하는 압력을 유지하기 위해서는 지속적인 가압이 필요하다(Fig. 4).

3.2 휴대용 공압 기반 유동 제어기의 유량 선도

본 논문에서는 휴대용 미세 유동 제어기 개발에 중점을 두고 미세 유체 실험을 용이하게 하는 것을 목표로 한다. 하지만 휴대용 미세 유동 제어기에 사용되는 휴대용 펌프의 경우 설정한 공압에 도달하면 작동을 중단하기 때문에 공압을 일관되게 유지하는 것에 한계가 있어 이를 해결하는 것은 중요한 과제이다.

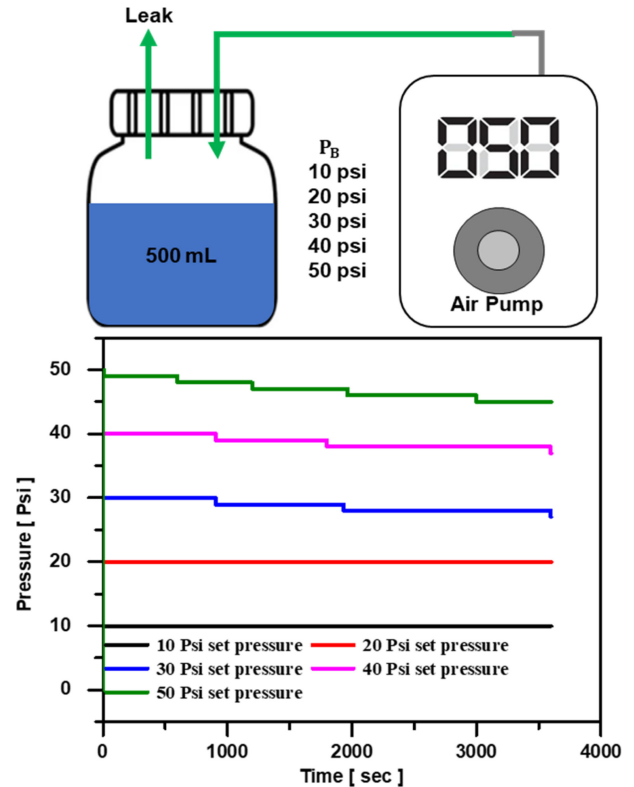


Fig. 4 Experiments and Experimental results of pneumatic maintenance at various pressures

이는 큰 공병을 사용함으로써 일정시간 압력을 유지할 수 있지만 지속적으로 압력을 유지하는 것에서는 한계가 있다. 이러한 문제는 유속이 시간에 따라 변동하기 때문에 안정적인 미세 유동을 생성하는 것을 방해한다. 이러한 장애물을 극복하려면 일정하고 균일한 공압을 보장하기 위한 추가 전략을 사용해야 하며 이는 안정적인 미세 유체 작동에 중요하다. 그래서 본 논문에서는 펌프를 반복적으로 작동시킴으로써 일정한 미세 유량을 지속하는 방법을 사용한다.

휴대용 펌프의 지속적인 작동으로 압력 수준을 지속적으로 유지하여 유리병 내부에서 빠져나가는 압력이 10% 이내로 유지했다. 이 시스템은 유속이 지배적인 압력과 채널의 길이 모두 복잡하게 연결되어 있다. 특히 병 내부의 압력이 증가하면 유속이 비례적으로 증가하여 증류수가 배출되고 그에 따라 유속이 조정된다. 또한, 증류수가 미세 유체 채널을 통과함에 따라 유체 고유의 점성으로 인해 채널 벽을 따라 저항이 형성되어 전체적인 유량이 감소한다. 유체가 직면하는 저항은 채널 길이에 따라 증가하여 유속이 더욱 감소한다. 이러한 원리를 이용하여 다양한 압력과 채널 길이를 설정하여 유량 선도를 확인했다(Fig. 5(i)).

본 실험은 채널 길이와 병 내부 압력의 변화에 따라 유량의 변화를 관찰하는 것이다. 처음에는 채널 길이를 일정하게 유지하고 압력을 증가시켜 유량의 변화를 확인했다. 결과 유량 곡선은 압력이 증가함에 따라 유량 또한 증가함을 확인할 수 있다. 다음으로, 채널 길이에 따라 유량 증가 폭이 일정하게 감소하는

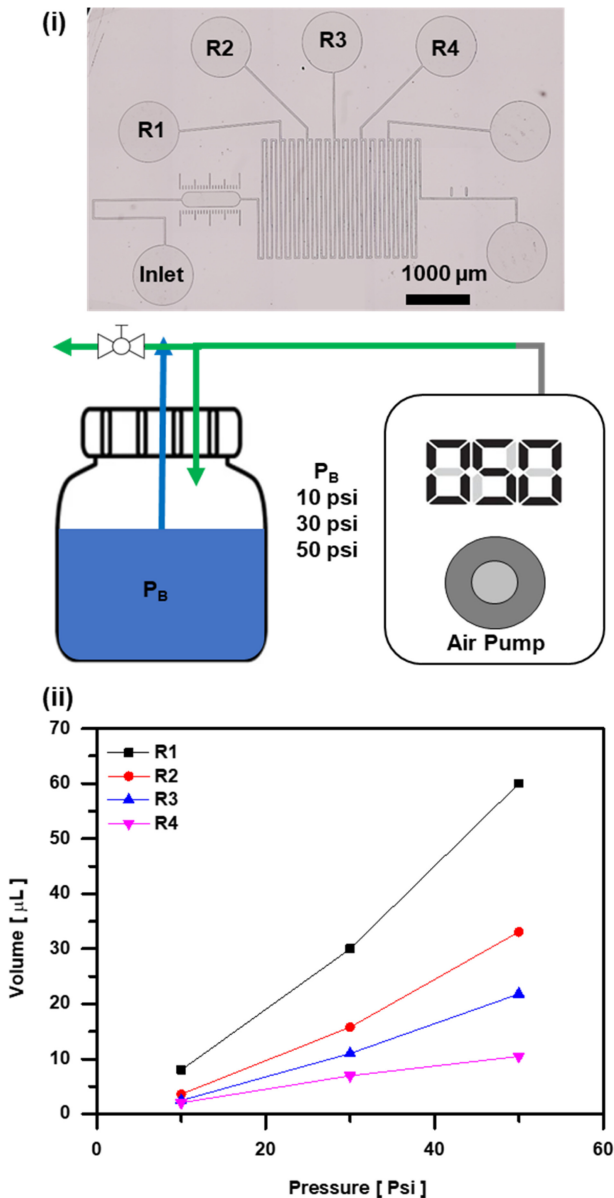


Fig. 5 Flow verification; (i) Experimental method and (ii) Flow profile as a function of pressure and channel length

것을 확인할 수 있다. 결론적으로, 채널 길이와 병 내부 압력이 유량을 결정하는 데 중요한 역할을 한다는 것을 보여준다. 또한 본 연구에서 사용한 휴대용 펌프를 반복적으로 작동하면 본 논문에서 제작한 휴대용 공압 유동 제어기의 압력 유지 기능을 사용할 수 있다(Fig. 5(ii)).

3.3 휴대용 공압 유동 제어기와 기존 공압 유동 제어기의 성능 비교

본 논문에서 제작한 공압 기반 미세 유동 제어 시스템은 쉽게 접근할 수 있는 공기 펌프 모듈을 활용하여 배터리 전원과 독립적으로 작동하고 전원 공급 장치 가용성에 관계없이 실험에 사용할 수 있다. 그러나 휴대용 펌프의 주요 문제점은 설정된 공기압 한계에 도달하면 작동을 멈추는 경향이 있어 일관된

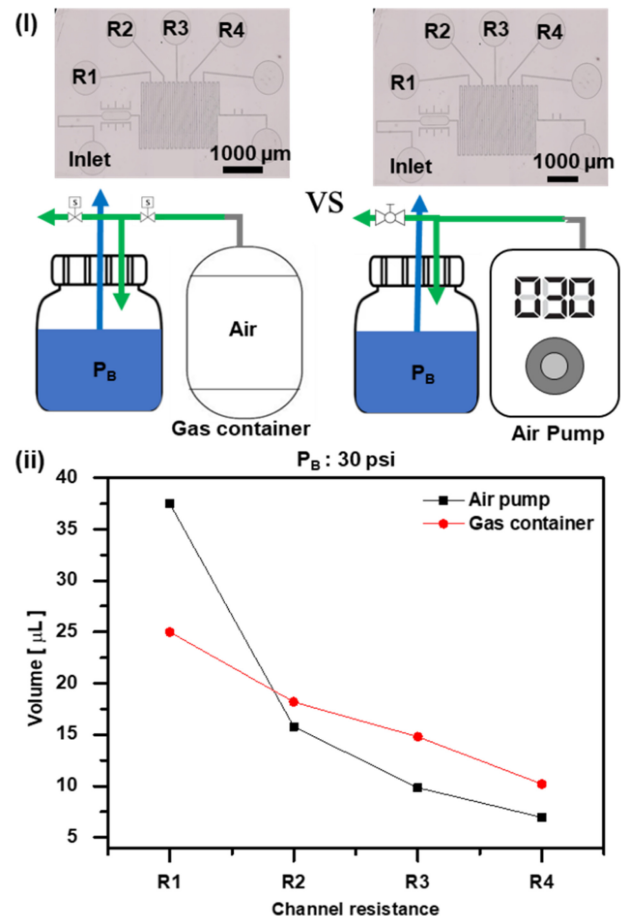


Fig. 6 Comparison with conventional microfluidic controllers; (i) Experimental method and (ii) Flow profile as a function of pressure and channel length

공기압을 유지하는 데 어려움이 있다는 점이다.

이러한 제한은 병의 크기 증가로 어느 정도 해결이 가능하지만 일정시간 간격으로 압력 감소로 인해 변동이 지속된다. 이를 해결하기 위해 펌프를 지속적으로 작동시켜 일정한 압력을 유지함으로써 일정한 유량을 보장한다. 휴대용 공압 유동 제어기의 개발에 따라 우리의 목표는 기존 공압 유량 제어기와 비교하여 그 유용성을 평가하는 것이다. 그래서 두 제어기를 비교하여 성능 특성을 비교하고 본 논문에서 제작한 휴대용 유동 제어기의 유동 제어 능력을 평가한다(Fig. 6(i)).

본 실험은 기존의 공압 유동 제어기와 휴대용 공압 유동 제어기의 성능을 확인한다. 두 유동 제어기의 압력은 30 psi로 고정하고 각각의 채널 길이에 대한 1시간 유량을 측정했다. R1의 경우, 휴대용 공압 유동 제어기가 기존 공압 유동 제어기보다 높은 유량이 관찰된다. 이는 휴대용 펌프의 오버슈트 현상으로 인해 갑작스럽게 공병 내에 높은 압력이 형성되는 현상과 짧은 채널 길이로 인한 압력 분배의 미흡으로 인해 발생된다. 그러나 그래프를 살펴보면 특정 채널 길이 이상에서는 오버슈트로 인한 압력이 유량에 미치는 영향이 미미해지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 휴대용 공압 유동 제어기를 사용하기 위해서는 최소

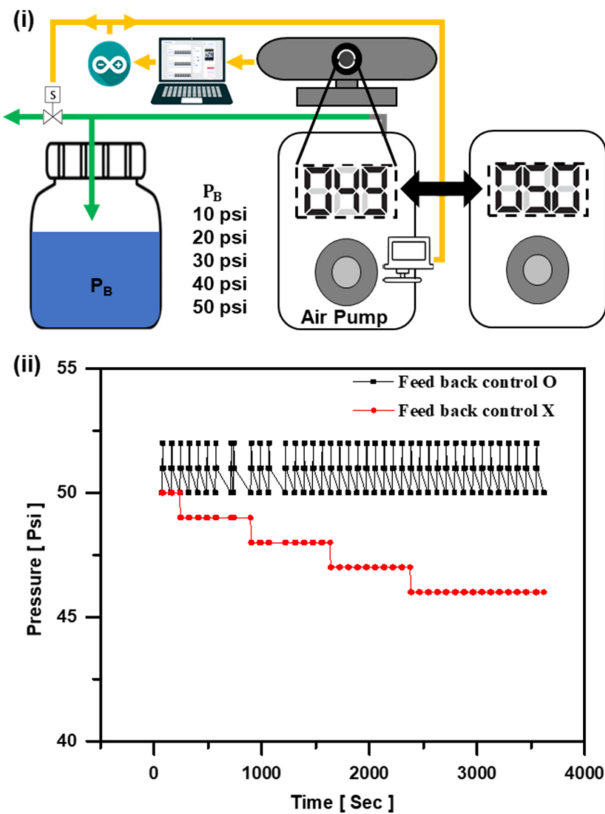


Fig. 7 Sustained pressure maintenance utilizing feedback control; (i) Schematic of pneumatic maintenance method utilizing image analysis technique and (ii) Comparison of pneumatic maintenance with and without feedback control

한의 채널 길이가 필요함을 알 수 있다. 이는 R1을 제외한 다른 다양한 채널 길이에서는 기존 공압 유동 제어기와 비슷한 유량 감소폭을 관찰할 수 있었으며, 이는 오버슈트로 인한 압력 변동이 일정 채널 길이를 유지함으로써 최소화될 수 있음을 시사한다. 결론적으로 휴대용 공압 유동 제어기는 기존 기술과 유사한 성능을 보이며 유량에 큰 차이가 없음을 확인했다(Fig. 6(ii)).

3.4 공압 유지를 위한 인공지능 영상 분석 자동화 시스템

본 논문에서 제작한 휴대용 공압 유동 제어기는 공병에 설정한 압력을 지속적으로 유지하기 위해 펌프를 작동시켜야 한다. 현재 시중에 판매되는 휴대용 펌프는 코딩을 변경하거나 아두이노 명령어를 입력할 수 없는 제약이 있기 때문에 해결책으로 영상 분석 장치를 활용하는 방법을 제안한다. 이 방법은 터치블 머신을 활용하여 원하는 모델을 미리 학습시키고, 웹캠을 통해 수집된 정보를 아두이노 우노를 이용하여 판단한다. 이 시스템은 펌프의 압력이 설정한 압력보다 낮아지면 서보모터를 작동시켜 펌프의 버튼을 다시 눌러준다. 또한 압력이 높아지면 솔레노이드 밸브를 열어 압력을 감소시킨다. 이를 통해 공병의 압력을 자동으로 유지할 수 있다. 이러한 시스템은 휴대용 공압 유동 제어기의 사용을 보다 효율적으로 만들어주며, 사용자가 직접 펌프를 조작할 필요 없이 안정적인 작동을 보장한다. 또한, 영상 분석을 통해 자동으로

압력을 조절하는 기능은 사용자의 부담을 줄여줄 뿐만 아니라 공정의 안정성과 일관성을 향상시킨다(Fig. 7(i)).

이에 따라 본 연구에서 개발한 휴대용 공압 유량 제어 장치의 성능을 평가하기 위한 실험을 진행했다. 먼저, 빈 병 내부의 압력이 적절히 유지되는지 확인하기 위해 영상 분석 장치를 활용하여 펌프가 작동했을 때와 작동하지 않았을 때의 압력 감소율을 1시간 동안 측정하고 그래프로 나타냈다. 이때 압력은 50 psi로 설정되었으며, 최적의 압력 감소율을 나타내는 500 ml 병을 사용했다. 결과적으로 영상 분석 장치는 항상 50 psi 이상의 압력을 유지하며 ± 2 psi의 오차 범위를 갖습니다. 반면, 영상 분석 장치를 사용하지 않고 빈 병의 압력을 유지할 때 압력이 지속적으로 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 이미지 분석장치를 통해 공압이 효과적으로 유지된다는 것을 입증할 수 있고, 본 연구에서 개발한 영상 분석 장치의 필요성을 확인했다(Fig. 7(ii)).

3.5 공압 유지를 위한 인공지능 영상 분석 자동화 시스템을 활용한 유량 측정

본 논문에서 제작한 휴대용 공압 유동 제어기는 사용자가 직접 펌프를 조작할 필요 없이 안정적인 작동을 보장한다. 또한 영상 분석을 통한 자동 압력 조절 기능은 사용자의 부담을 줄일 수 있는 장점이 있다. 그러나 여기에 추가적으로 검토해야 할 사항이 존재한다. 압력은 유지되었지만 유량에 대한 판단은 아직 이루어지지 않았다. 따라서 본 실험에서는 인공지능 영상 분석 시스템을 활용하여 유량을 측정하고 이를 기반으로 본 연구에서 개발한 시스템의 필요성과 성능을 평가하고자 한다(Fig. 8(i)).

본 연구에서는 제작한 휴대용 공압 제어기의 유량 특성을 분석했다. 먼저 압력을 50 psi로 고정하고 채널의 저항을 변경하여 1시간 동안 유량을 측정했다. 실험 결과, R1에서 보다 많은 유량을 확인할 수 있었다. 이를 통해 일정한 채널 길이가 형성되어야 채널 형상이 변하지 않아 원하는 유량이 나온다는 사실을 확인할 수 있었고, 그 길이가 R2 이상의 채널 길이가 형성되어야 함을 알 수 있다(Fig. 8(ii)).

마지막으로 채널 길이를 R2로 고정하고 각각의 압력을 유지했을 때 1시간 동안의 유량을 측정했다. 실험 결과, 압력이 증가할수록 유량이 증가하는 특성이 나타났다. 이를 통해 유량과 압력 증가 비율이 일정하다는 사실을 확인할 수 있었다. 종합적으로 본 연구의 결과는 휴대용 공압 유동 제어기가 유량을 일정하게 유지할 수 있음을 입증했다(Fig. 8(iii)).

4. 결론

다양한 미세 유체 응용 프로그램에서는 정확한 유량 제어가 필수적이다. 현재 시장에서 제공되는 유량 제어기는 이러한 요구를 충족하지만, 높은 비용과 생물학적 연구에는 부적합하며, 제한된 공간에서만 사용할 수 있는 단점이 있다. 이에 본 논문에서는 비용과 기술적 장벽을 낮춘 마이크로 단위의 미세 유량

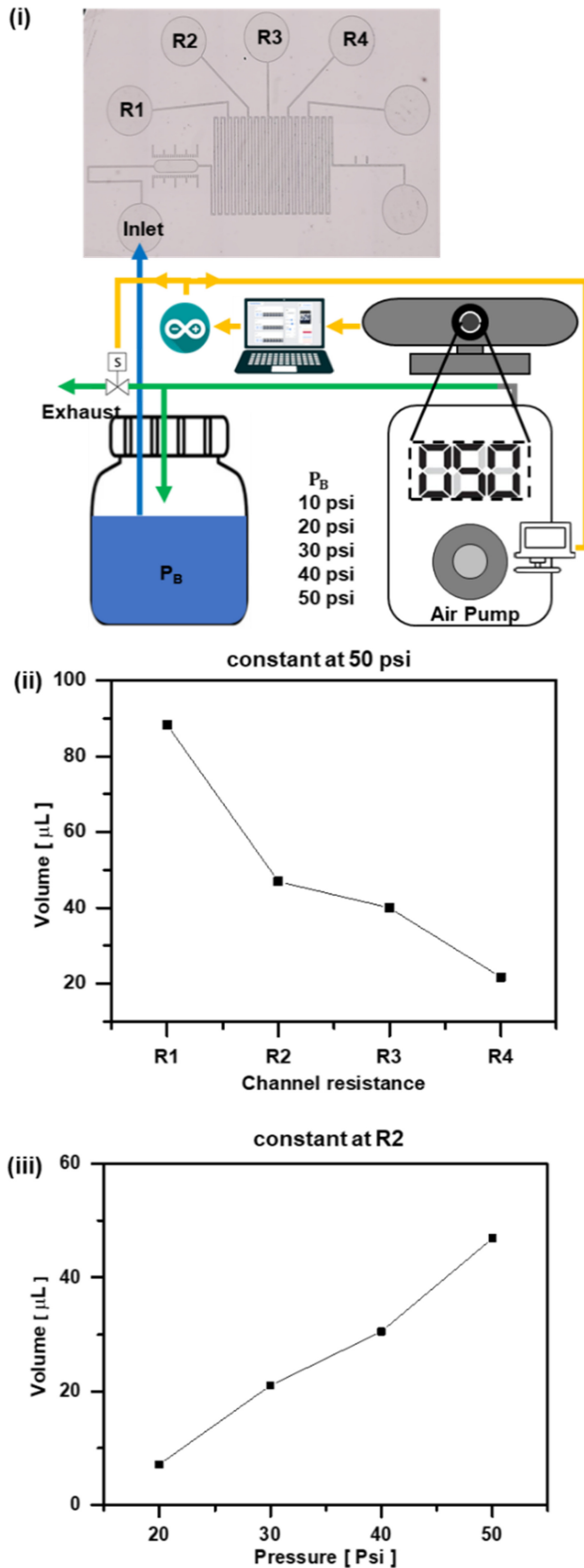


Fig. 8 Sustained flow rate maintenance utilizing feedback control; (i) Schematic of flow rate maintenance method utilizing image analysis technique, (ii) Flow profile as a function of channel length, and (iii) Flow profile as a function of pressure

제어기를 개발했다. 본 연구에서는 미세 유체학 분야에서 사용되는 기존의 공압 탱크를 휴대용 공기 펌프로 대체함으로써 이 장치를 다양한 환경에서 사용할 수 있도록 했다. 또한, 인공지능과 임베디드 시스템을 활용하여 일정한 압력을 유지하는 기술을 도입하여 미세 유동을 생성했다. 그러나 공기 펌프의 특성상 압력 유지가 어려운 문제가 있다. 그래서 본 연구에서는 이를 해결하기 위해 인공지능과 임베디드 시스템을 활용하여 지속적인 압력을 보정하였고, 이로써 1시간 이상의 실험도 가능함을 확인했다. 또한, 오버슈트 문제에 대해서도 인공지능과 임베디드 시스템을 이용하여 해결책을 마련했다. 결론적으로, 본 논문에서 개발한 미세 유동 제어기는 기존의 공압 탱크를 이용한 유동 제어 장치와 동등한 성능을 보여주었으며, 소형화된 디자인으로 실험의 유동성을 높였다. 또한, 이 시스템은 빠르고 간편하며 경제적인 방법으로 미세 유체 응용 실험을 수행할 수 있음을 확인하여, 미세 유동 제어기의 발전에 기여할 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 국립금오공과대학교 학술연구비로 지원되었음 (2021년도).

REFERENCES

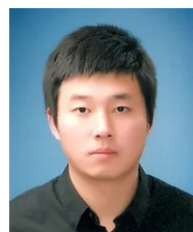
1. Yeo, L. Y., Chang, H. C., Chan, P. P., Friend, J. R., (2011), Microfluidic devices for bioapplications, *Small*, 7(1), 12-48.
2. Livak-Dahl, E., Sinn, I., Burns, M., (2011), Microfluidic chemical analysis systems, *Annual review of chemical and biomolecular engineering*, 2(1), 325-353.
3. Broyles, B. S., Jacobson, S. C., Ramsey, J. M., (2003), Sample filtration, concentration, and separation integrated on microfluidic devices, *Analytical chemistry*, 75(11), 2761-2767.
4. Hasic, S., Murthy, S. K., Koppes, A. N., (2016), Microfluidic sample preparation for single cell analysis, *Analytical chemistry*, 88(1), 354-380.
5. Zhang, X., Zhang, Z., (2019), Microfluidic passive flow regulatory device with an integrated check valve for enhanced flow control, *Micromachines*, 10(10), 653.
6. Baroud, C. N., Gallaire, F., Dangu, R., (2010), Dynamics of microfluidic droplets, *Lab on a Chip*, 10(16), 2032-2045.
7. Roman, G. T., Chen, Y., Viberg, P., Culbertson, A. H., Culbertson, C. T., (2007), Single-cell manipulation and analysis using microfluidic devices, *Analytical and bioanalytical chemistry*, 387, 9-12.
8. Cai, Z., Smith, N. L., Zhang, J.-T., Asher, S. A., (2015), Two-dimensional photonic crystal chemical and biomolecular sensors, *Analytical chemistry*, 87(10), 5013-5025.

9. Luk, V. N., Wheeler, A. R., (2009), A digital microfluidic approach to proteomic sample processing, *Analytical chemistry*, 81(11), 4524-4530.
10. Heo, Y. J., Kang, J., Kim, M. J., Chung, W. K., (2016), Tuning-free controller to accurately regulate flow rates in a microfluidic network, *Scientific reports*, 6(1), 23273.
11. Coppeta, J. R., Mescher, M. J., Isenberg, B. C., Spencer, A. J., Kim, E. S., Lever, A. R., Mulhern, T. J., Prantil-Baun, R., Comolli, J. C., Borenstein, J. T., (2017), A portable and reconfigurable multi-organ platform for drug development with onboard microfluidic flow control, *Lab on a Chip*, 17(1), 134-144.
12. Lake, J. R., Heyde, K. C., Ruder, W. C., (2017), Low-cost feedback-controlled syringe pressure pumps for microfluidics applications, *PLoS One*, 12(4):e0175089.
13. Islam, M. M., (2010), Needle syringe program-based primary healthcare centers: Advantages and disadvantages, *Journal of Primary Care & Community Health*, 1(2), 100-103.
14. Matsubara, T., Choi, J. S., Kim, D.-H., Kim, J.-W., (2022), A microfabricated pistonless syringe pump driven by electro-conjugate fluid with leakless on/off microvalves, *Small*, 18(15), 2106221.
15. Li, Z., Mak, S. Y., Sauret, A., Shum, H. C., (2014), Syringe-pump-induced fluctuation in all-aqueous microfluidic system implications for flow rate accuracy, *Lab on a Chip*, 14(4), 744-749.
16. Davis, J. J., Padalino, M., Kaplitz, A. S., Murray, G., Foster, S. W., Maturano, J., Grinias, J. P., (2021), Utility of low-cost, miniaturized peristaltic and venturi pumps in droplet microfluidics, *Analytica chimica acta*, 1151, 338230.
17. Clime, L., Brassard, D., Geissler, M., Veres, T., (2015), Active pneumatic control of centrifugal microfluidic flows for lab-on-a-chip applications, *Lab on a Chip*, 15(11), 2400-2411.
18. Komeya, M., Hayashi, K., Nakamura, H., Yamanaka, H., Sanjo, H., Kojima, K., Sato, T., Yao, M., Kimura, H., Fujii, T., Ogawa, T., (2017), Pumpless microfluidic system driven by hydrostatic pressure induces and maintains mouse spermatogenesis in vitro, *Scientific Reports*, 7(1), 15459.
19. Liu, X., Yang, X., Zuo, W., Bai, Y., Zhou, H., Wang, J., Shao, J., Shang, Z., (2022), Research of control method for pneumatic control of pneumatic microchips, *SLAS technology*, 27(5), 290-301.
20. Amini, H., Lee, W., Di Carlo, D., (2014), Inertial microfluidic physics, *Lab on a Chip*, 14(15), 2739-2761.
21. Li, J., Zhu, L., Zhang, M., Lin, F., (2012), Microfluidic device for studying cell migration in single or co-existing chemical gradients and electric fields, *Biomicrofluidics*, 6(2), 24121-2412113.
22. Xi, H.-D., Guo, W., Leniart, M., Chong, Z. Z., Tan, S. H., (2016), Ac electric field induced droplet deformation in a microfluidic t-junction, *Lab on a Chip*, 16(16), 2982-2986.
23. Grant, K. M., Hemmert, J. W., White, H. S., (2002), Magnetic field-controlled microfluidic transport, *Journal of the American Chemical Society*, 124(3), 462-467.
24. Giouroudi, I., Kokkinis, G., (2017), Recent advances in magnetic microfluidic biosensors, *Nanomaterials*, 7(7), 171.
25. Burger, S., Schulz, M., Von Stetten, F., Zengerle, R., Paust, N., (2016), Rigorous buoyancy driven bubble mixing for centrifugal microfluidics, *Lab on a Chip*, 16(2), 261-268.
26. Clime, L., Malic, L., Daoud, J., Lukic, L., Geissler, M., Veres, T., (2020), Buoyancy-driven step emulsification on pneumatic centrifugal microfluidic platforms, *Lab on a Chip*, 20(17), 3091-3095.

**Woohyun Park**

B.S. candidate in the Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology. His research interest is microfluidics & nano-bio system.

E-mail: pwh1011@kumoh.ac.kr

**Minseok Kim**

Professor. candidate in the Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology. His research interest is microfluidics & nano-bio system.

E-mail: mkim@kumoh.ac.kr