

Bio/Micro Fluid Mechanics Laboratory

장수영 · 김원정[†]

<http://fluids.sogong.ac.kr>

1. 서 론

본 연구실은 2013년 이후로 마이크로(micro) 스케일의 유체역학을 바탕으로 다양한 미소유체의 움직임을 이해하고 응용하는 연구를 진행하고 있다. 마이크로/나노 공학이 발전함에 따라 기계, 부품, 재료들이 점차 작아지고 소형화되고 있다. 유체기기의 크기가 초소형으로 바뀔에 따라 유체의 움직임을 분석함에 있어 매크로(macro) 시스템에서는 경험하지 못했던 물리적 현상들이 중요하게 여겨지기 시작했다. 시스템의 크기가 작아질수록 중력과 같은 체적력(body force)은 작아지고 반대로 표면 장력과 같은 선력(line force)은 점점 커진다. 마이크로 스케일에서 유체의 움직임은 표면 장력이 지배하게 되며 다양하고 신비한 계면 현상(interfacial phenomena)이 나타난다.

본 연구실에서는 이러한 마이크로 스케일에서 일어나는 다양하고 신비한 유체의 움직임에 대해 실험적, 이론적 연구를 병행하여 진행하고 있다. 또한 생물학, 이론 역학, 재료 과학 및 공학에 이르는 다양한 학제 간 통합적인 연구를 수행하고 있다. 그리하여 자연을 비롯한 다양한 시스템에서 일어나는 미소유체의 움직임에 대해 물리적인 원리와 이론적인 기반을 제공하고, 이를 바탕으로 여러 분야에 공학적으로 응용될 수 있는 기술을 개발하고자 한다.

이 소개글에서는 현재 연구실에서 수행하고 있는 주제를 다공성 물질에서의 유동, 액체 금속의

유동, 초음파장에서 액적과 기포의 제어로 나누어 소개하려 한다. 각각의 주제에 대한 개괄적 설명과 함께 현재 수행하고 있는 이론적, 실험적 연구를 같이 설명하고자 한다.

2. 연구 내용 소개

2.1 다공성 물질에서의 유동

다공성 물질(porous material)이란 내부에 다수의 미세한 기공(pore)을 함유하고 있는 물질로서, 기공을 통해 유체가 침투할 수 있으며 흡착제, 촉매, 폐수 처리 등 다양한 분야에 응용된다. 우리는 일상생활에서도 종이, 스피커, 토양, 생물 조직 등 다양한 다공성 물질을 접할 수 있으며 이들 내부에서는 매우 복잡한 원리에 의해 유체가 이동한다. 다공성 물질에서 액체의 흡수는 일반적으로 모세관 현상에 기반하며 이와 동시에 물질의 변형, 물질 내부로 액체의 흡수 등이 동반된다. 본 연구실에서는 다양한 다공성 물질의 액체 흡수에 대해 sink가 존재하는 모세관 튜브에서의 또는 변형하는 모세관 튜브에서의 유동으로 모델링하여 이론적 해석을 진행하고 이를 실험적으로 검증하는 연구를 진행하고 있다. 이를 통해 다공성 물질의 액체 흡수에 대한 물리적 이해를 높이고 이들이 공학적으로 다양하게 응용될 수 있는 이론적 기반을 제시하고자 한다. 대표적인 다공성 물질로서 종이를 선정하여 종이를 구성하는 셀룰로오스 섬유 내부 공간으로 액체가 빠져나감을 실험적으로 밝히고, 이러한 유량을 같이 고려한 이론적 모델을 개발하였다(Chang, et al., 2018). 또한 하이드로겔에 대해서도 팽창을 동반한 물의 흡수를 이론적으로 풀어내고

[†] Department of Mechanical Engineering,
Sogang University
E-mail : wonjungkim@sogang.ac.kr

실험적인 검증을 진행 중에 있다.

이러한 이론적 해석을 토대로 종이, 하이드로젤, 다공성 금속 등 다양한 다공성 물질의 특징을 활용한 장치를 개발하였다. 하이드로젤은 빠른 속도로 물을 흡수하면서 팽창하는 물질로서 높은 물 흡수 능력을 가지고 있다. Fig. 1(아래)는 이러한 하이드로젤과 기계적인 강도가 높은 다공성 금속을 이용하여 개발한 미세유체장치용 펌프와 에너지 수확 장치이다. 하이드로젤은 빠르게 많은 양의 물 흡수를 하는 역할을 하고 다공성 금속은 물이 하이드로젤로 전달되기 위한 통로를 확보해주는 역할을 한다. 두 다공성 재료를 활용한 이 펌프는 기존의 미세유체 펌프들에 비해 높은 유량과 지속 시간을 자랑한다. 또한 왁스 프린팅을 통해 값싸고 빠르게 제작 가능한 종이 채널을 이온교환막과 결합하여 종이기반 이온 농도 분극 장치를 제작하였다 (Hong, et al., 2016). 이러한 이온 농도 분극 장치는 이론적 유동 해석을 통한 채널 설계를 통해 이온 농도를 33배까지 농축이 가능하다. 본 연구실은 현재 이러한 다양한 다공성 매질들의 열 및 물질 전달 특징을 이론적 해석을 바탕으로 실용적인 장치 개발을 하는 연구를 계속하여 진행하고 있다.

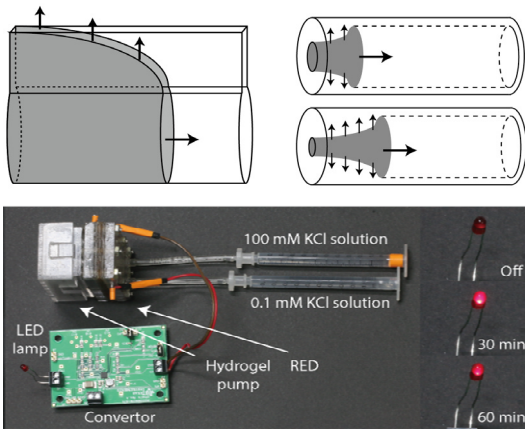


Fig. 1. (위) 다공성 물질에서 액체 흡수의 이론적 모델 개발 (아래) 하이드로젤과 다공성 금속을 이용한 펌프와 에너지 수확 장치

2.2 갈륨 기반 액체 금속의 유동

상온에서 액체 상태로 존재하는 갈륨(Gallium) 기반 액체 금속은 독성이 높아 사용이 극히 제한되는 수은과는 달리 상온에서 안정하고, 인체에 유해하지 않다는 특징을 가지고 있다. 더욱이 갈륨 기반 액체 금속은 높은 전기 전도성, 열전도성, 초탄성, 변형성, 재가공성 등 대체 불가능한 물리적 특성을 갖고 있어 유연한 전자소자, 웨어러블 디바이스 등의 분야에서 크게 주목을 받고 있다. 이러한 응용 가능성에도 불구하고 갈륨 기반 액체 금속은 표면장력이 매우 크고 대기 중의 산소와 반응하여 약 1 nm 두께의 산화막을 형성하는데, 산화막 양에 따라 표면장력이 급격히 변하기도 하고, 고체의 거동 특성을 보이기도 한다. 또한 산화막은 표면에 달라붙는 성질을 갖고 있어 갈륨 기반 액체금속의 조작과 사용을 어렵게 한다. 따라서 표면에 산화막이 생성된 액체금속의 거동은 기존의 방법으로는 해석이 어려울 뿐만 아니라, 산화막에 의한 표면장력 변화가 복잡한 유동을 추가로 발생시켜 액체금속의 가공과 이를 이용한 제어 기술에 주요한 어려움을 야기하고 있다.

본 연구실에서는 다양한 마이크로 유동에서 산화막이 야기하는 독특한 거동 특성 및 역할을 실험을 통해 확인하였다. 모세관 튜브에 산화막을 제거하는 환원제를 주입한 뒤 액체금속을 바로 주입하여 산화막이 생기지 않도록 조절한 경우와 빈 관에 액체금속을 주입하여 벽과 주입되는 액체금속 사이에 산화막이 존재하는 경우를 비교하여 실험하였다. 이를 통해 액체금속의 산화막이 존재할 때의 유동에서는 산화막에 의한 저항이 지배적이어서 점성 저항은 무시될 수 있는 유동의 형태를 보이며, 산화막의 저항력은 환원제 농도의 함수라는 것을 확인하였다. 이와 같은 액체금속 연구를 통하여 기존 유체현상과 비교하여 기존에는 없던 고체막이 존재할 때의 유체 거동 문제로 확장하여 연구를 진행하고 있다.

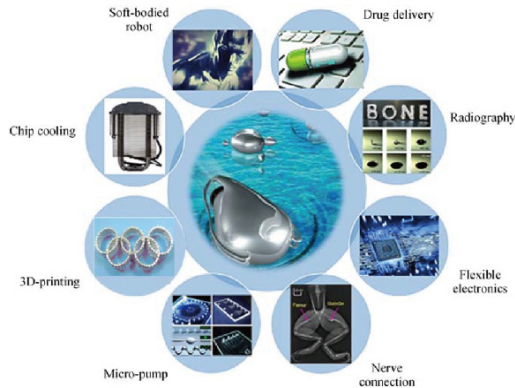


Fig. 2. 갈륨 기반 액체 금속의 다양한 활용분야 (Zhao, et al., 2017)

2.3 초음파 장에서 액적과 기포의 제어

초음파 관련 기술이 산업에 본격적으로 응용이 되기 시작한 것은 1900년대 초, 1차 세계대전부터이며 초창기에는 주로 초음파를 활용하여 잠수함을 탐지하는 방법으로 활용이 되었다. 지난 1 세기 동안 초음파 관련 기술은 더욱 발전하여 비파괴 검사, 초음파 가공, 세정 등 산업계의 다양한 분야에서 없어서는 안 될 핵심기술로 자리잡았다. 비교적 최근에는 초음파를 이용한 액적 제어 및 세포와 같은 마이크로 크기의 입자를 이동시키거나 배열하는 기술 역시 진행되어 오고 있다 (Yeo, et al., 2014). 또한 다양한 활용 분야 중에서 가장 널리 초음파가 활용될 수 있게끔 하는 현상은 공동 현상(cavitation)이며, 액체 내부에 초음파가 전파될 때 압력이 일정 주기로 증감을 반복하게 되고, 이 때 음압에 의해 기포가 성장하는 공동 현상(cavitation)이 발생하게 된다. 초음파장의 기포는 주기적인 압력 변동에 의해 계면이 팽창과 수축을 반복하는 동시에 음향 압력 구배에 따라 이동하는 특성을 보인다. 공동 현상(cavitation)이 주로 활용되는 산업은 단연 초음파 세정을 꼽을 수 있는데, 이 때 기포의 활동성이 세정 결과에 직접적으로 영향을 미친다는 사실 역시 기존 연구를 통해 알려져 있다 (Kim, et al., 2009). 본 연구실에서는 초음파 가진 시 액적의 contact line의 움직임을 파악하고, 다양한 초음

파 세정 조건에서 기포가 보이는 거동 특성 등을 분석하고자 한다. 이를 통해 초음파를 활용하여 dip coating, 액침 노광, 초음파 세정 등에 산업적으로 활용하고자 한다.

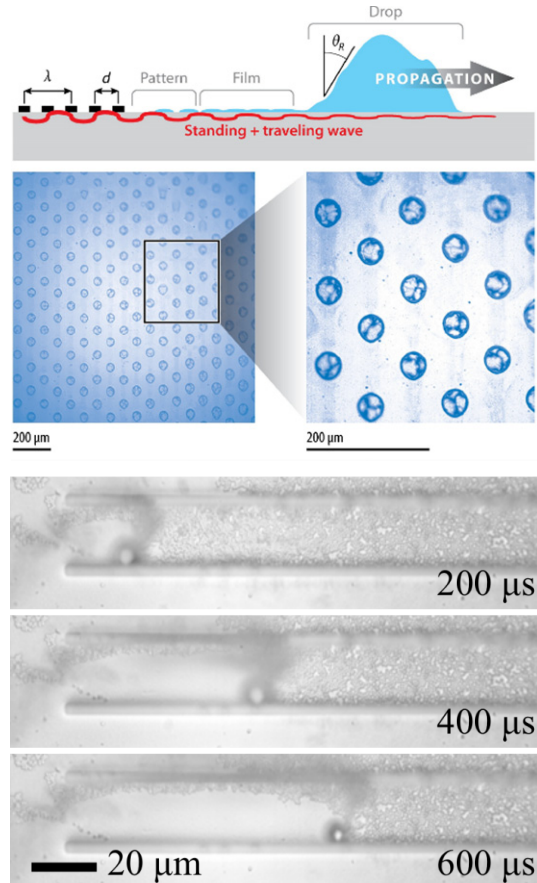


Fig. 3. (위) 표면 음향파를 이용한 액적의 제어 (Yeo, et al., 2014) (아래) 기포의 활동성으로 인한 초음파 세정 효과 (Kim, et al., 2009)

3. 맺음말

마이크로 유체역학은 마이크로 스케일의 미세한 유체의 이동을 이해하고 응용하는 학문으로서 마이크로 스케일을 기반으로 하는 다양한 분야에 응용될 수 있다. 서강대학교 생체/미세 유체역학 연구실은 앞으로도 다공성 물질, 액체 금속, 초음파 장 등 다양한 분야에서 미세한 유체의 움직임을

역학을 이해하고 이론적 모델을 제시하며 이에 기반한 응용 기술을 개발하는 연구를 진행할 것이다. 또한 물리학, 식물학, 의공학 등 다양한 분야의 연구진과 함께 공동 연구를 진행하여 학문적 및 공학적 응용을 더욱 넓히고자 한다. 본 연구실은 현재 박사과정 2인, 석·박사 통합과정 2인, 석사과정 2인으로 구성되어 있으며, 연구실에 대한 자세한 내용은 연구실 홈페이지(<http://fluids.sogang.ac.kr>)에서 확인 할 수 있다.

REFERENCE

- 1) S. Chang, J. Seo, S. Hong, D. Lee, and W. Kim. "Dynamics of liquid imbibition through paper with intra-fibre pores." *Journal of Fluid Mechanics* (2018)
- 2) S. Hong, R. Kwak, and W. Kim. "Paper-based flow fractionation system applicable to preconcentration and field-flow separation." *Analytical Chemistry* (2016)
- 3) Zhao Xi, Shuo Xu, and Jing Liu. "Surface tension of liquid metal: role, mechanism and application." *Frontiers in Energy* (2017)
- 4) L. Y. Yeo, and J. R. Friend. "Surface acoustic wave microfluidics." *Annual Review of Fluid Mechanics* (2014)
- 5) W. Kim, T.-H. Kim, J. Choi, and H.-Y. Kim. "Mechanism of particle removal by megasonic waves." *Applied Physics Letters* (2009)