

멀티스케일 유체역학 연구실 Multi-scale Fluid Mechanics Laboratory

이진기

성균관대학교 기계공학부

1. 서론

공학적인 기술과 지식이 발전함에 따라 인간은 눈으로 직접 관찰 및 분석이 가능하던 매크로 스케일의 거시적인 현상에 대한 연구에서 더 나아가 눈에 보이지 않는, 미시적인 현상에 대한 관심을 가지게 되었다. 이에 따라 미시세계 관찰할 수 있는 주사형 전자현미경(scanning electron microscope, SEM), 원자간력 현미경(atomic force microscope, AFM) 등과 같은 여러 장비들이 개발되었을 뿐 아니라 유체를 컨트롤 해줄 수 있는 다양한 장비들 역시 고도화, 직접화되어 왔고 현재까지도 발전이 지속되는 중이다. 그로 인하여 자연스럽게 마이크로, 나노스케일에서의 유체 거동에 대한 관심이 높아졌으며 지금도 관련된 연구들이 활발하게 이루어지고 있다.

마이크로, 나노 스케일에서의 유체 거동에서는 유체에 가해진 외력뿐만 아니라 유체 주변의 다양한 환경 조건역시 중요한 요인으로 작용하게 된다. 이 때문에 미세유체역학(micro/nano fluidics)은 유체 현상의 분석을 위해 다양한 외부 조건들에 대한 고려가 필요한 매우 복잡한 문제일 뿐만 아니라 경우에 따라 중력을 무시하고 모세관 힘(capillary force)을 지배적인 요인으로 해석하는 등 매크로 스케일의 유동 현상을 해석하는데 쓰이던 기존 이론 이외의 다른 방식으로 접근하고 해석 할 필요가 있다. 이러한 미세유체역학 현상은 전기장 및 자기장에 의한 유체 운동, 바이오칩, 자연모사 공학, 미세전자기계시스템(Micro Electro Mechanical Systems,

MEMS) 등 다양한 분야에서 활용될 수 있어 그 중요성 역시 대두되고 있다.

본 연구실에서는 다양한 조건의 유체역학 현상을 매크로, 마이크로, 나노 스케일로 구분하고 각 조건의 스케일에 부합하는 이론적인 접근 방법을 토대로 적절한 스케일의 실험실 환경을 구축해 실험적으로 구한 결과나 시뮬레이션 결과 등을 활용하여 현상을 이론적으로 정립하며 이를 확장시키는 연구를 진행하고 있다. 즉 다양한 스케일의 유체역학적인 현상을 해석하여 응용 가능 분야에 보다 효과적으로 적용, 발전을 도모하는 것을 목표로 한다.

본 연구팀에서 수행중인 연구과제는 다음과 같다. 1) 종이기반 미세 유체 기기(paper based micro fluidic device, μ PAD) 개발 2) 식물 모사를 통한 무동력 펌프 및 액추에이터 개발 3) 미산성 차아염소산수 얼음 생산 장비 최적화 4) 자동차 창문 습기 억제 기술 개발 5) 얼음 면과의 마찰 최적화를 위한 마이크로 구조물 개발 등과 같은 다양한 분야의 연구를 수행하고 있다. 연구 수행에 있어 관련된 다른 전공의 전문가들이나 실제 산업현장에 위치한 전문가들과도 협업하면서 보다 다각적인 접근방법을 가질 수 있도록 하고 있으며 또한, 국가 기관이나 산업체와도 협력적인 관계를 구축해 나가면서 폭 넓은 분야에 관심을 가지고 연구를 수행하고 있다.

2. 연구 내용 소개

2.1 종이 기반 미세 유체 기기(paper based micro fluidic device, μ PAD) 개발

종이 기반 센서 개발은 의료용 진단, 외부 환경 변화 감지나 식품 품질 관리 등을 목적으로 다양한 분야에서 사용되고 있으며 제작비용의 저렴함, 제작과정의 용이함, 사용 방식의 간결함과 넓은 범용성이란 장점을 갖고 상업화 역시 활발히 진행되면서 미세유체역학 분야에서 각광받고 있는 연구 분야이다. μ PAD를 제작하는 방법들은 잉크젯 프린팅, 플라즈마 처리, 페이퍼 커팅, 왁스 프린팅 등 현재까지도 다양한 기법들이 제시되면서 꾸준히 연구되고 있다. 이러한 μ PAD의 유동은 모세관현상에 의해서 흘러가며 능동제어의 방식보다는 수동제어의 방식이라 할 수 있다. 그리하여 종이 위에서 유체가 흐르는 현상에 대한 이론적인 분석이 필수적이며 본 연구실에서는 농림수산식품기술기획평가원의 지원으로 고부가가치 식품기술 개발 산업을 통해 μ PAD위에서의 유체 전개에 대한 이론적인 모델을 만들고 시간에 따른 유체의 전개 거리를 제어 가능하도록 구현하여 식품 품질관리 센서로 활용하기 위한 연구를 진행하고 있다.

연구를 위한 μ PAD를 제작하는 방법으로는 그림 1과 같이 Photolithography 장비를 이용하여 SU-8을 사용해 제작하는 방법과 그림 2와 같이 왁스프린팅 장비를 이용하였다. 그 외에도 페이퍼 커팅 장비를 이용하여 필요에 따라서는 μ PAD를 간편하게 제작할 수 있는 기반을 마련하였다. μ PAD의 경우 종이 기반의 유체기기로 porous media로 구성되어 있어 Lucas-Washburn 공식을 따를 것으로 생각할 수 있으나 본 연구의 경우 섬유질로 이루어진 μ PAD가 부풀어 흐르는 현상, 채널을 흐를 때 생기는 SU-8 혹은 벽면의 wax에 의한 저항, 채널의 유로 비틀림(tortuosity)에 대한 고려 등이 필요하다. 따라서 이를 고려하여 공식을 수정하였고 실험을 통해 새로운 공식을 따르는 것을 확인하였다. 그림 4는 실험을 위해 제작한 두 가지 다른 재료의 μ PAD위에서 물을 전개시켰을 때 이동한 거리가 채널의 두께에 의해 어떻게 변화하는지를 실험한 그래프이다. 채널을 만드는 재료에 따라서 채널벽면의 접촉각이 유체에 따라 달라질 수 있으며 또한 그 저항값은 채널의 두께가 충분히 얇을 때는 괜찮으나 좁을 때는 영향을 미치는 것을 확인하였다. 왁스 채널의 경우 소수성질을 가지기 때문에 물에 대한 저항이 크며 상대적으로 SU-8의 경우는 적음을 알 수 있으며 이는 이론적으로도 확인되었다. 반면 그림 5의 경우에는 전개 유체를 물 대신 소수성을 가진 지방산을 사용하였을 때이다. 이 경우 wax채널의 경우 지방산에 의해 녹기 때문에 사용할 수 없으며 SU-8으로만 만들어진 채널로 실험을 진행하였다. 이때 작동 유체와 SU-8 벽면 모두가 소수성을 띄고 있기 때문에 저항으로 작용하지 않으며 채널 간격에 따른 유체의 전개 거리의 변화가 없음을 확인 할 수 있다.

널벽면의 접촉각이 유체에 따라 달라질 수 있으며 또한 그 저항값은 채널의 두께가 충분히 얇을 때는 괜찮으나 좁을 때는 영향을 미치는 것을 확인하였다. 왁스 채널의 경우 소수성질을 가지기 때문에 물에 대한 저항이 크며 상대적으로 SU-8의 경우는 적음을 알 수 있으며 이는 이론적으로도 확인되었다. 반면 그림 5의 경우에는 전개 유체를 물 대신 소수성을 가진 지방산을 사용하였을 때이다. 이 경우 wax채널의 경우 지방산에 의해 녹기 때문에 사용할 수 없으며 SU-8으로만 만들어진 채널로 실험을 진행하였다. 이때 작동 유체와 SU-8 벽면 모두가 소수성을 띄고 있기 때문에 저항으로 작용하지 않으며 채널 간격에 따른 유체의 전개 거리의 변화가 없음을 확인 할 수 있다.

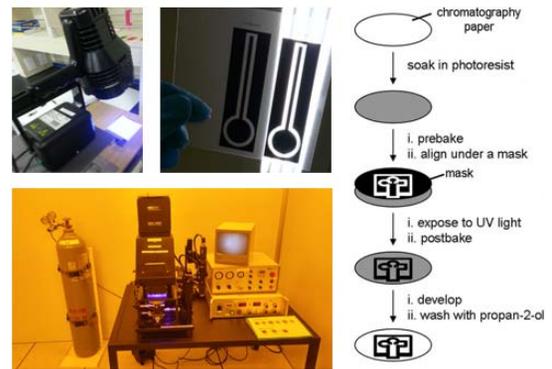


Fig. 1. Photolithography를 통한 μ PAD제작

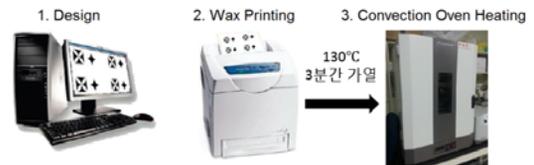


Fig. 2. 왁스프린팅을 통한 μ PAD제작

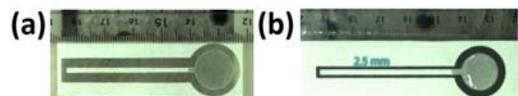


Fig. 3. 제작된 (a) SU-8 (b) Wax μ PAD

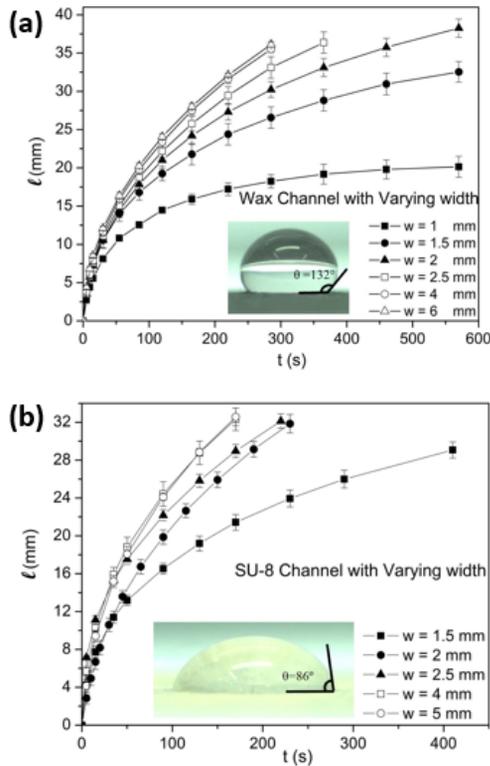


Fig. 4. 시간에 따른 물의 전개 거리 측정 (a) Wax Chip (b) SU-8 Chip

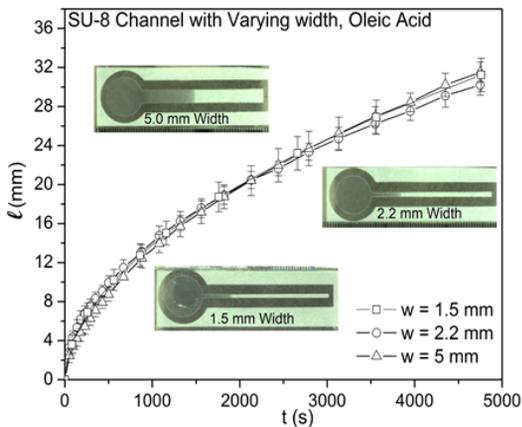


Fig. 5. 시간에 따른 지방산의 전개 거리 측정

그림 6은 채널 내부에 구조물을 만들어 지방산을 전개시킬 때 대한 결과로 구조물이 저항으로 작용하여 전개속도가 감소하는 것을 확인할 수 있

으나 구조물의 밀도가 일정 이상이 될 경우 구조물 끼리의 거리가 작아져 유로 비틀림(tortuosity)이 무시되며 오히려 전개속도가 길어짐을 확인할 수 있다.

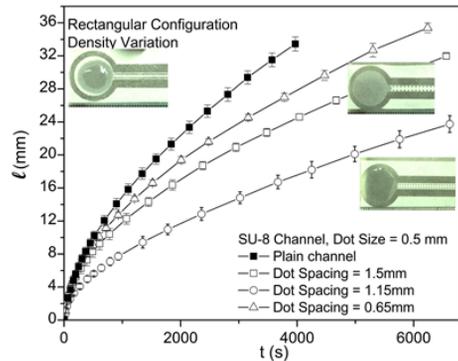


Fig. 6. SU-8 채널 내부 구조물에 따른 지방산 전개 거리 측정

이러한 연구 활동은 μ PAD에서 유체의 전개 속도를 조절하는 것에서 더 나아가 유체 물리/화학/생물학적 현상의 제어에도 사용할 수 있을거라 기대하며 각종 분석 및 결과를 직관적으로 확인할 수 있는 μ PAD를 개발할 수 있는 기반 기술이 될 것으로 기대된다.

2.2 식물 모사를 통한 무동력 펌프 및 액추에이터 개발

생체 모방 공학(Biomimetics)은 자연에 있는 생물체의 행동 양식이나 생물체 자체가 가지고 있는 특별한 특성들에 대한 원리를 규명하고 인간의 기술에 적용하여 더 효과적이거나 더 효율적인 기술을 창출하는 분야이다. 특히 식물의 경우 매우 오랜 세월동안 진화를 거듭하면서 서식하고 있는 주변 환경에 가장 최적화된 형태로 발전해왔기 때문에 식물을 모사하는 것은 생체 모방 공학 중에서도 연구할만한 가치가 있는 학문중 하나라고 생각할 수 있다. 식물의 경우 성장을 위해 물을 흡수하는 과정에서 별다른 동력원 없이 조직 세포간의 상호작용을 통한 삼투압 및 계면장력에 의해 뿌리부터 잎에 이르기 까지 물을 운송시키는 것이 가능하다. 본 연구실에서는 한국연구재단의 신진연구 지원

사업을 통해 이러한 식물의 물 수송 원리를 활용할 방안을 대한 연구를 진행하고 있다.

다공성 하이드로젤(porous hydrogel)의 종류중 하나인 아가로스 젤(agarose gel)은 수많은 나노 기공(pore)을 형성하는 물질로 얼리게 될 경우 내부에 마이크로/나노 스케일의 조직이 형성되면서 나뭇잎 내부 구조를 모사한 형상을 띄게 된다. 본 연구실에서는 이 구조물 내부에 형성되는 계면장력을 이용하면 음압이 형성되면서 무동력 펌프역할을 할 수 있을 것으로 판단하여 이에 대한 실험을 진행하였다.

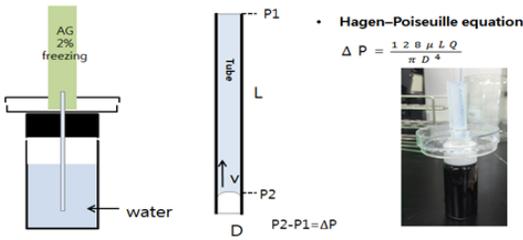


Fig. 7. 음압 측정 실험 셋업 계략도 및 실제 실험 사진

그림 7과 같이 아가로스 젤을 모세관과 연결하여 계면장력에 의해 물과 실리콘오일 사이 계면의 높이 변화와 접촉각을 측정하여 관 내부에 걸리는 음압을 Hagen-Poiseuille식과 계면장력, 정수압력의 밸런스를 이용하여 계산하였다. 이때 실리콘 오일은 아가로스 젤에 걸리는 최대 음압을 측정하기 모세관이 걸리는 저항을 높이는 용도로 사용하였다. 실험 결과 그림 8과 같이 실리콘 오일의 점도가 높아짐에 따라 계면이 올라가는 속도가 낮아지고 모세관 끝단의 압력이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 압력 측정기를 통해 나뭇잎을 모사한 아가로스 젤에 실제 걸리는 압력을 측정한 결과 계면 속도를 이용해 계산한 압력과 비슷한 값이 나오는 것을 확인하였고 시간에 따라 압력이 증가하는 경향성 역시 확인 할 수 있었다. 이를 통해 아가로스 젤을 이용하여 무동력 펌프로 사용할 수 있다는 것을 확인할 수 있었으며 이를 발전시켜 아가로스 젤 내부의 마이크로나노 스케일의 다공성 매질의 구조가 어떤 식으로 내부 유동에 영향을 미쳐 펌프 역할을 하는 것인지에 대한 이론적인 모델로 발전시키기 위한 연구를 수행하고 있다.

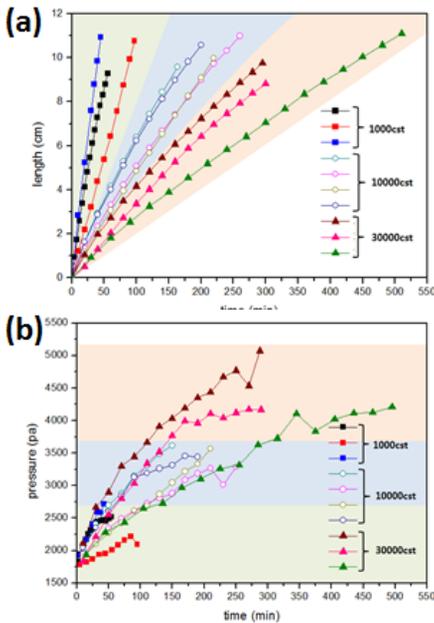


Fig. 8. (a) 시간에 따른 실리콘오일과 물 계면의 위치 와 (b) 압력

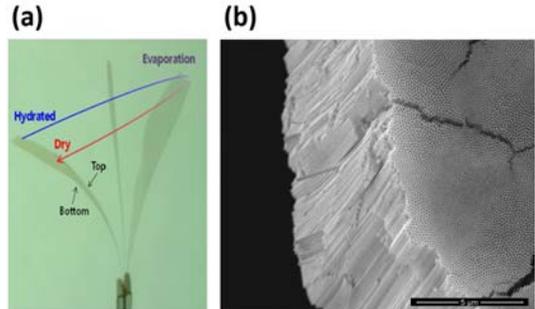


Fig. 9. (a) 구조물의 actuating 과정 (b) 구조물 표면의 SEM 이미지

펌프개발과 더불어 연구하고 있는 주제는 actuator이다. 습도에 의해 젖거나 마르는 과정에서 구조물이 움직이게 되는 현상을 갖는 물질을 hygromorphic 특성을 갖는다 하며 자연에서 그 예시로 솔방울 등이 있다. 본 연구팀은 전기분해를 통해 표면에 나노스케일의 관이 있는 hygromorphic 특성을 갖는 구조물을 제작하였다. 이 구조물은 표

면이 젖고 마르는 과정 중 *acuating* 현상을 일으키면서 그림 9의 (a)와 같이 움직이며 이러한 *acuating* 구조물은 (b)와 같은 형태이다. 새로운 구조기반 *actuator*가 어떠한 원리를 통해 움직이는지 연구를 진행하고 있다.

이러한 식물 모사 연구를 통해 무동력으로 펌핑 작용을 하는 것과 움직임을 만드는 효과들은 차후 *energy harvesting*이나 MEMS 장비 또는 센서 등을 개발하는데 응용할 수 있을 것으로 기대된다.

2.3 미산성 차아염소산수 얼음 생산 장비 최적화

미산성 차아염소산수란 락스와 같은 차아염소산 나트륨계열의 물질이나 알코올 등과 같은 다른 기타 소독물질들과 비교해 보았을 때 우수한 살균력을 가지면서 여러 국가에서 식품첨가물로 분류되어 있을 정도로 인체에 유해성은 매우 적은 살균제이다. 다만 인체에 무해하다고 판단할 수 있는 ppm 범위가 지정되어있고 최적의 살균작용을 일으키기 위해서 요구되는 pH역시 정해져 있기 때문에 효과적인 사용을 위해서는 적절한 생산과정이 요구된다. 그림 10에서 보논바와 같이 5-6.5pH로 30ppm 이상의 차아염소산 농도가 일반적이다.

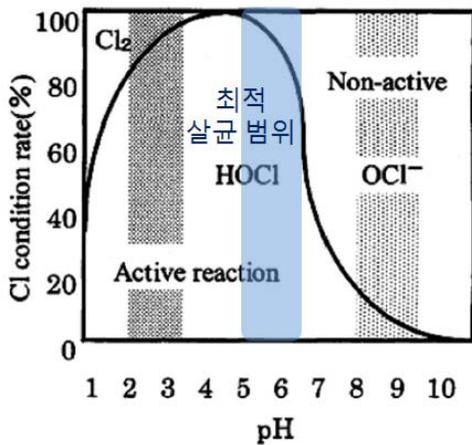


Fig. 10. 차아염소산수의 최적 살균 조건

식품의 유통, 특히 수산물 위판장의 경우 어류 판매 시 밑에 얼음을 깔고 진열하는 경우가 대부분인데 이 과정에서 수산물에 남아있던 미생물이 번

식하는 문제가 발생한다. 하지만 이 차아염소산수를 통해 얼음을 만들게 될 경우 얼음이 녹는 과정에서 미생물의 살균작용이 가능해져 진열 및 판매 과정에서 미생물의 번식 및 수산물의 부패 등을 방지할 수 있는 기능을 갖게 된다.

본 연구실에서는 한국해양과학기술진흥원의 지원으로 수산물 유통·가공 기술개발 사업을 수행하면서 앞서 언급한 차아염소산수가 포함된 얼음을 만드는 장비를 개발하기 위한 연구를 진행하고 있다. 얼음 생산에 앞서 차아염소산 생성 장비를 최적화하려는 목적으로 전해조 내에서 차아염소산수의 전기분해 과정을 시뮬레이션을 통해 전기분해 효율을 분석하였다(그림 11). 그 결과 전해조 내부 전극간의 간격이 2 mm이고 전극의 개수가 3개일 때 가장 전기분해 효율이 높은 것을 확인하였고 이를 토대로 전해조를 그림 12와 같이 제작하였다. 제작된 전해조를 이용하여 전기분해 과정을 진행하였고 실제 생성된 차아염소산수의 pH와 ppm을 측정하여 생성된 차아염소산수의 적절성을 확인하였다.

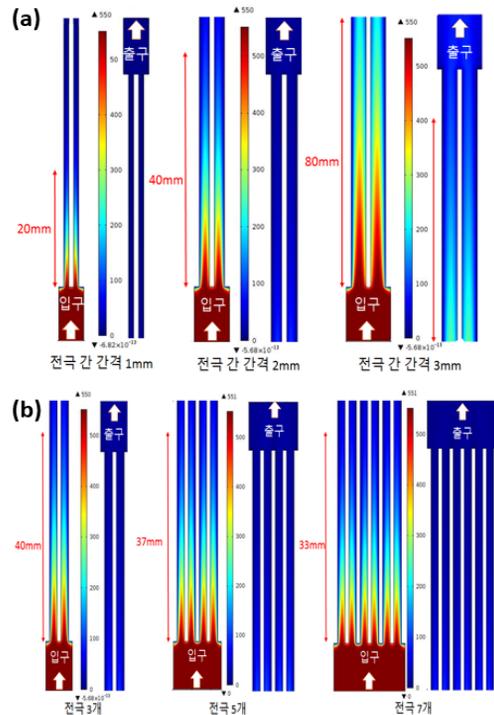


Fig. 11. 전해조 내부 전기분해 시뮬레이션: (a) 전극 간격에 따른 전기분해 결과 (b) 전극 개수에 따른 전기분해 결과

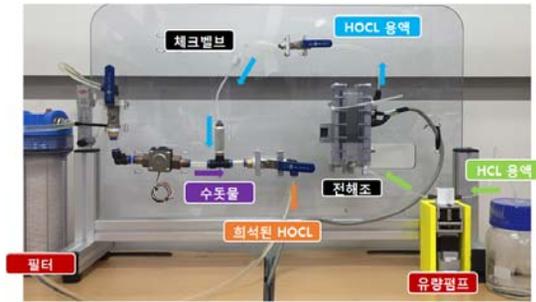


Fig. 12. 연구실에서 개발한 실험용 장비

차후에는 이러한 차아염소산 생산 장비를 제빙기와 연동시켜 차아염소산이 얼음 내에 적절하게 포집된 상태로 얼음을 만들기 위한 연구가 진행 중이다. 이 과정을 통해 최적화된 차아염소산 얼음 생산 장비를 제작하게 될 경우 수산물 위판장만이 아니라 기타 식료품의 보존을 위해 얼음을 이용하는 경우에 유용하게 쓰일 수 있으며 국민 건강 증진에도 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

24 자동차 창문 습기 억제 기술 개발

자동차 전면 유리부의 김서림 현상은 바깥 온도가 낮고 비가 오거나 눈이 오는 등의 환경 속에서 차량 외부와 내부의 온도 차이에 의해 발생하는 현상으로 운전자의 전면 시야를 막아 사고를 일으킬 수 있는 위험 인자이기 때문에 이를 방지하기 위한 다양한 연구가 진행되어 왔다. 차량 내부 공조시스템을 개선하거나 특별한 코팅 처리를 하여 김이 서리는 것을 방지하는 등 여러 방법들이 제시되고 있다. 그러나 공조시스템의 유속 등을 조절하여 특정 차종에 대한 김서림 방지 대책을 제시하더라도 차량마다 내부의 구조가 다르고 공조장치 자체도 상이하기 때문에 근본적인 해결책이라고 할 수 없다는 문제를 갖고 있다. 또한 에어컨을 가동하여 차량 외부와 내부의 온도 차이를 줄이는 방법도 있으나 이 역시 운전자의 입장에서 불편을 호소할 수 있다는 문제가 있다. 또한 코팅 처리의 경우에는 지속성(durability)이라는 또 다른 문제를 갖고 있다.



Fig. 13. 차량 전면 유리 김서림 현상

본 연구실에서는 이러한 고질적인 김서림 문제를 해결하기 위해 차량 유리 부 아래에 위치한 디프로스터(defroster)를 통해 토출되는 유동의 특성을 바꾸는 방법을 제시하기 위한 연구를 진행하고 있다. 김서림 현상을 단순한 열전달 하나만의 문제가 아닌 물질전달까지 고려해야 하는 복합적인 문제로 생각하여 차량 내부의 공기 순환을 통해 열전달 및 물질전달의 효율을 극대화 하려는 목표를 갖고 있으며 이에 대한 분석을 위해 그림 14와 같이 입자영상 유속계(particle image velocimetry, PIV) 시스템을 구축하여 관련된 연구를 진행하고 있다. 디프로스터를 통해 토출되는 유동 특성을 가시화 기법을 이용하여 분석하고 이를 조절하기 위한 다양한 실험을 진행하고 있다.

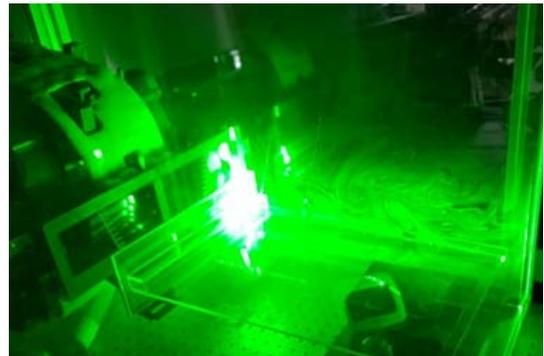


Fig. 14. 입자영상 유속계 실험장치

본 연구는 산학 협력을 통해 다양한 차종에 대해 적용 가능한 습기 억제(defogging) 기술을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

2.5 얼음 면과의 마찰 최적화를 위한 마이크로 구조물 개발

일반적으로 마찰현상이 실제현장에 적용되는 사례를 살펴보게 되면 상황에 따라 마찰을 저감시키거나 마찰을 증가시키는 등 다양한 목적으로 연구가 진행되고 있다. 마찰을 저감시키는 것이 주목적으로 사용되는 현장에서는 고체 물질에 있는 요철들끼리 맞물리는 현상(stick slip)등에 의해 고체 표면이 마모(wear)되는 현상을 줄이는 데에 초점을 맞추고 있으며 마찰을 증가시키는 목적으로는 의도치 않은 미끄러짐 현상 등으로 야기되는 피해들을 최소화하는 데에 초점을 두고 있다.

이중 마찰을 저감시키기 위한 연구들을 살펴보면 서로 접촉하는 두 표면 사이에 윤활제(lubricant)등을 첨가하여 윤활마찰 현상을 유도하여 마찰 계수를 현저하게 낮출 수 있는 방법이 제시되고 있다. 윤활마찰 현상의 경우 표면 사이에 존재하고 있는 윤활제의 양에 따라 두 표면이 거의 접촉한 상태인 경계마찰(boundary lubrication), 두 표면이 부분적으로 닿아있는 상태인 혼합마찰(mixed lubrication), 두꺼운 윤활 층으로 인해 두 표면이 거의 닿지 않게 되는 유체마찰(hydrodynamic lubrication)로 그 영역이 구분되며 각 상황에 따라 마찰 현상들이 달라져 상황에 맞는 심도 있는 분석이 요구된다.

특히 얼음과의 마찰의 경우 마찰 운동 초기에는 일반적인 고체간의 마찰과 유사한 현상을 보이다 마찰 운동이 지속되면서 발생한 열에 의해 얼음이 녹게 된다. 이때 얼음이 녹으며 생성된 물 층이 윤활제로 작용하면서 윤활마찰이 일어나면서 얼음 면은 일반적인 고체 표면간의 마찰에 비해 훨씬 낮은 마찰 계수를 갖게 된다. 이러한 마찰 현상은 그림 15와 같이 마찰하는 물체 표면과 얼음, 그리고 생성된 물 층들이 서로 상호작용을 하는 일종의 다상유동(multiphase flow)로 해석할 수 있으며 그만큼 복잡한 문제로 아직까지 얼음과의 마찰에 있어 명확한 이론적인 모델이 제시되지 않고 있다.

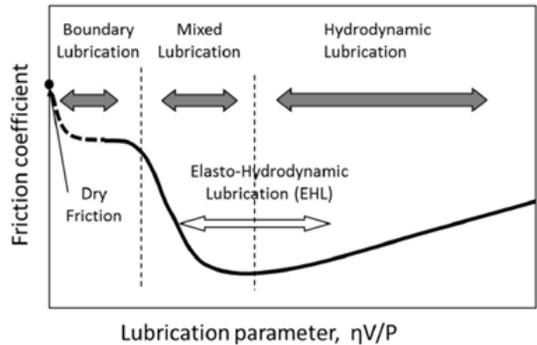


Fig. 15. 윤활마찰 영역에 따른 마찰계수 변화

따라서 본 연구실에서는 미래창조과학부의 지원으로 스포츠과학화 융합연구 사업을 수행하면서 얼음 면과의 마찰 현상을 물리적으로 이해하여 마이크로 구조물을 통해 마찰 계수를 최적화시키기 위한 연구를 진행하고 있다.

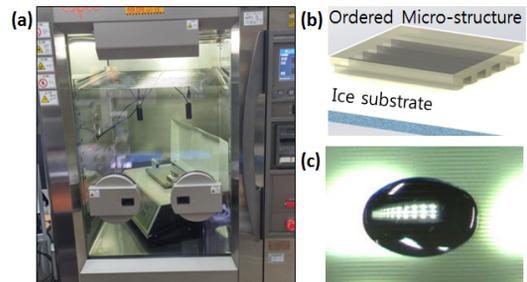


Fig. 16. 얼음-마이크로 구조물간 마찰 측정: (a) 온도조절 챔버 및 그 내부에서 영하조건 실험중인 마찰 시험 장치 (b) 마찰 시험 도식화 (c) 마이크로 구조물의 비등방성

표면에 일차형태의 마이크로 구조물이 존재할 경우 구조물 형상을 따라 물방울이 걸리게 되면서 그림 16과 같이 접촉각이 비등방성을 갖는 것을 확인할 수 있다. 이 때문에 마이크로 구조물의 형상이나 진행 방향등에 의해 마찰계수가 변화하며 이를 분석하기 위해 항온항습장비와 마찰계수 측정 장비를 이용하여 얼음 면 위에서 마찰계수 변화를 측정하고 다양하게 조건을 변화시켜 가면서 특정 상황에서 마찰계수를 최적화시킬 수 있는 마이크로 구조물의 규격 및 형태 등을 제시하기 위한 연구를 진행하고 있다.

3. 결 론

자연계에 존재하는 다양한 유체역학적인 현상들은 모두 적절한 분석을 위해 요구되는 저마다의 스케일이 있으며 각 현상을 일으키는데 중요한 역할을 하는 힘이 존재한다. 이론을 현실적인 문제에 접목시키기 위해서는 이러한 스케일과 지배적으로 작용하는 힘(dominant force)을 잘 구분하는 능력이 요구된다. 때문에 본 연구실은 다양한 스케일의 다양한 유동 특성과 관련된 연구를 지속적으로 수행하면서 유체역학적인 현상을 이해하고 분석하는 것에 집중하고 있다. 본문에서 간략하게 소개한 연구들과 더불어 전기장 내 섞이지 않는 유체 (immiscible fluid)간의 전기융합(electro coalescence), 계면을 지나는 미세 자성구슬(micro bead)의 운동 특성, μ -PIV를 활용한 혈류역학 분석 등 유체학적 지식과 더불어 복합적인 공학적 지식을 요구하는 융합연구도 수행하면서 보다 넓은 시야를 가지기 위한 노력을 하고 있으며 더 자세한 사항은 mfml.skku.edu로 방문하면 찾아볼 수 있다.

REFERENCE

- 1) Jafry, A. T., Lim, H., Kang, S. I., Suk, J. W., & Lee, J. (2016). A comparative study of paper-based microfluidic devices with respect to channel geometry. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 492, 190-198.
- 2) AL-HAQ, M. I., SUGIYAMA, J., & ISOBE, S. (2005). Applications of electrolyzed water in agriculture & food industries. *Food Science and Technology Research*, 11(2), 135-150.
- 3) Di Mundo, R., d'Agostino, R., & Palumbo, F. (2014). Long-lasting antifog plasma modification of transparent plastics. *ACS applied materials & interfaces*, 6(19), 17059-17066.
- 4) Kadokawa, J. I. (2013). *Ionic Liquids-New Aspects for the Future*.