

친수성/소수성 수평 표면상에서의 액적이송에 관한 새로운 개념

명 현 국*†

* 국민대학교 기계시스템공학부

A New Concept to Transport a Droplet on Horizontal Hydrophilic/Hydrophobic Surfaces

Hyon Kook Myong*†

* School of Mechanical Systems Engineering, Kookmin Univ.

(Received November 18, 2013 ; Revised January 7, 2014 ; Accepted January 13, 2014)

Key Words: Droplet Transport(액적이송), Hydrophilic/Hydrophobic Surface(친수성/소수성 표면), Wall Adhesion(벽면부착), Surface Wettability Gradient(표면 습윤성 기울기), VOF(Volume of Fluid), Numerical Simulation(수치해석), CFD(전산유체역학)

초록: 유체이송 기술은 최근 마이크로 유체시스템 개발에서 핵심문제로 인식되고 있다. 본 논문에서는 외부동력을 사용하지 않고 액적을 이송시킬 수 있는 새로운 개념을 제안하고, 수치해석을 통해 증명하였다. 제안된 장치는 표면을 단순하게 친수성과 소수성 표면의 복합표면으로 구성하는 것이다. 새로운 개념을 입증하기 위한 수치해석은 보존적인 압력기반 유한체적방법에 기초한 비정렬 셀 중심 방법 및 VOF 방법에 체적포착법인 CICSAM을 채용하고 있는 자체개발 코드(PowerCFD)를 사용하였다. 연구결과 본 연구에서 제안된 개념이 마이크로 유체시스템에서 액적이송에 대해 우수한 성능을 나타내는 것으로 확인되었다.

Abstract: A fluid transport technique is a key issue for the development of microfluidic systems. In this paper, a new concept for transporting a droplet without external power sources is proposed and verified numerically. The proposed device is a heterogeneous surface which has both hydrophilic and hydrophobic horizontal surfaces. The numerical simulation to demonstrate the new concept is conducted by an in-house solution code (PowerCFD) which employs an unstructured cell-centered method based on a conservative pressure-based finite-volume method with interface capturing method (CICSAM) in a volume of fluid (VOF) scheme for phase interface capturing. It is found that the proposed concept for droplet transport shows superior performance for droplet transport in microfluidic systems.

1. 서론

유체이송(fluid transport) 기술은 최근 화학적 분석 및 생물학적 검정 시스템과 같은 마이크로 유체(micro fluidic) 시스템 개발에서 핵심문제로 인식되고 있다. 이것은 이들 시스템이 일회성이며싼 가격으로 신속하게 반응해야만 하기 때문이다. 이러한 마이크로 스케일 시스템에서는 표면장력이 관성력을 압도하는 주된 힘이 되므로, 표면장력에 의해

구동되는 유체작동(fluidic actuation)에 대한 연구가 많이 수행되고 있으며, 표면 습윤성 기울기(surface wettability gradient)는 오랫동안 액적이송을 제어하기 위해 적용되어져 왔다.⁽¹⁻⁵⁾ 여기서 액적의 자율적인 움직임은 전형적으로 액적 안팎에서 발생하는 비평형 Laplace 압력의 결과로 야기되는 유동 때문이다. 따라서 일반적으로 액적조작(droplet manipulation)은 액적 표면 습윤성 기울기를 인공적으로 조작하는 것으로, 현재 열적, 전기적 및 감응원리에 기초한 다양한 메커니즘을 이용하고 있으나, 온도상승, 전기퍼텐셜, 화학적 상용성의 간섭과 같은 근본적

† Corresponding Author, myong@kookmin.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

인 문제가 생체적용(bioapplication)에 있어서 부작용을 야기할 수 있다.⁽¹⁾

최근 표면에 거칠기(roughness) 등을 주는 방법과 같이 물리적으로 표면의 미세구조 형상(pattern)을 변화시키든지, 화학적으로 표면에 표면에너지의 기울기 (gradient)를 만들어 주는 포토 패터닝(photo patterning) 기술을 이용함으로써 결과적으로 표면 습윤성 기울기, 즉 벽면부착력(wall adhesion force)을 변화시키는 방법이 제안되어 이에 관한 연구가 활발하게 수행되고 있다.⁽¹⁻⁵⁾ 이러한 벽면부착력의 차이에 의한 Laplace 압력 구동메커니즘은 외부동력을 사용하지 않고, 또한 열적, 전기적, 화학적 문제로부터 야기되는 부작용이 없다는 면에서 마이크로 유체 시스템을 설계하기 위한 적절한 개념을 제공할 수 있다.

본 논문에서는 외부동력을 사용하지 않고 표면장력에 의해 구동되는 유체작동에 관한 기초연구로, 표면을 단순하게 친수성(hydrophilic)과 소수성(hydrophobic) 표면의 복합표면으로 구성하고, 액적이 이 경계면에 놓아 유체의 응집력과 부착력 사이의 힘의 불균형 특성을 최대한 이용하여 액적을 자동 이송시킬 수 있는 새로운 개념을 제안하고자 한다. 또한 친수성/소수성 표면에 놓인 반원통형 액적을 대상으로 액적의 움직임에 대한 수치해석을 통해 이 개념의 타당성을 입증하고자 한다.

2. 액적조작을 위한 새로운 개념

2.1 기존의 무동력 유체작동 연구동향

외부동력을 사용하지 않고 표면장력에 의해 구동되는 유체작동에 관한 기존의 연구는 전술한 바와 같이 표면에 인위적으로 거칠기를 만들어 미세구조 형상을 변화시키는 물리적 방법과 화학적으로 표면에 자가조립 단분자막을 형성시켜 표면에너지의 기울기를 만들어 주어 결과적으로 표면 습윤성 기울기, 즉 벽면부착력을 변화시키는 방법이다.⁽¹⁻⁵⁾ 물리적인 방법의 일례로 Shen 등⁽²⁾은 다양한 구조화된 표면에서의 수은 액적을 작동시키는 힘에 대해 이론적으로 분석하고 실험적으로 테스트하여, 액적의 부착력이 표면 거칠기를 조절함으로써 설계될 수 있다고 보고함으로써 표면 거칠기 형상 설계가 마이크로 유체장치에서 중요한 역할을 할 가능성을 높였다. He and Lee⁽³⁾는 반반하고 거친 표면을 절충시켜 거침반환장치(roughness switchable device)를 제안하였다. 이들은 액적이 반반하고 거친 소수성 표면 사이의 경

계에 놓여 있으면, 접촉각 차이에 의한 곡률반경의 차이로부터 액적 내부에 압력 차이가 존재하며, 이 압력 차이에 의해 액적이 움직여 경계를 벗어나는 것을 제시하였는데, 이 현상은 액적의 소수성이 강한 표면으로부터 소수성이 상대적으로 약한 표면으로 움직이는 경향이 있음을 제시하고 있다. Yang 등⁽⁴⁾은 다양한 거칠기 형상 표면 상에서 소수성 차이에 의한 단일 액적의 자동 이송 메커니즘을 제안하고 실험 및 해석적으로 입증하였다. 즉, 이들은 점진적으로 거칠기를 증가시키는 조직을 가진 표면으로 구성된 형상화된 표면상의 액적이 표면 거칠기가 증가하는 방향으로 연속적으로 움직일 수 있음을 입증하였다. 그러나 이들은 전체 액적이송거리가 액적의 직경수준 정도라고 보고하고 있다.

한편 화학적 방법의 일례로 Liao 등⁽⁴⁾은 표면에 자가조립 단분자막을 형성시키고 여기에 확산제어 실란화(diffusion controlled silanization) 처리를 하여 표면에너지의 기울기를 변화시키는, 즉 접촉각을 변화시키는 표면을 만들어 물액적(water droplet)에 대해 실험적으로 테스트하였다. 이들은 소수성이 강한 표면으로부터 소수성이 상대적으로 약한(상대적으로 친수성이 큰) 표면 방향으로 물액적이 연속적으로 이동한다고 보고하였다. 또한 이들은 물액적이 일반적으로 가속 및 감속의 두 단계를 반복하면서 꿈틀꿈틀(squirm)거리며 이동하며, 액적의 변형, 표면장력 및 마찰력이 이것의 주된 원인이라고 보고하였다. 한편, Ito 등⁽⁵⁾은 광분해(photodegradation) 기술을 사용해서 화학적으로 표면에너지의 기울기를 변화시키는, 즉 접촉각을 변화시키는 표면을 만들어 물액적에 대해 실험적으로 테스트하였다. 이들은 표면에너지 기울기에 의존하는 속도와 함께 소수성 표면으로부터 친수성 표면쪽으로 액적이 퍼지면서 이동하며, 기울기가 클수록 물액적이 더 빠르게 이동한다고 보고하였다. 그러나 이들이 보고한 평균이동속도는 상당히 느린 0.5-6 mm/s이었으며, 액적 움직임에 대한 구동력이 표면에너지 기울기로부터 야기되는 접촉각 히스테리시스와 함께 침투이론(percolation theory)에 기초한 모세관력이라고 보고하였다.

이상 살펴본 바와 같이 기존의 무동력 유체작동에 관한 연구는 공통적으로 표면을 물리적 또는 화학적 방법을 사용하여 표면 습윤성 기울기, 즉 벽면부착력을 점진적으로 변화시키고 있기 때문에, 액적이 표면과 만나는 계면에서의 벽면부

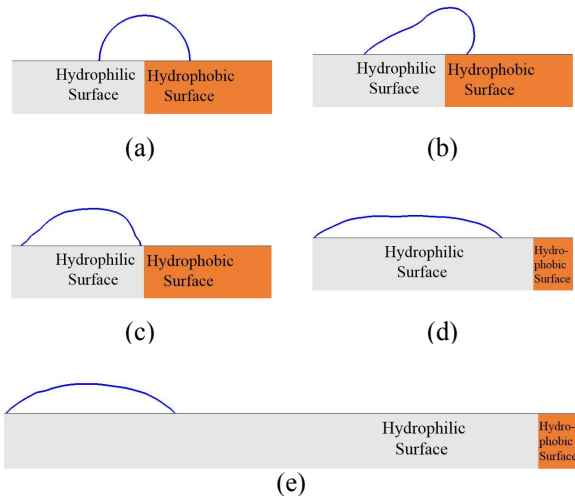


Fig.1 A new concept to transport a droplet on hydrophilic/hydrophobic surface.

착력 차이(표면에너지의 차이)가 액적을 움직이는 주된 구동력으로 작용하고 있다. 또한, 점진적인 표면 습윤성 기울기를 만들어 주어야하기 때문에 제작상의 어려움과 함께 작동장치의 크기도 제한을 받게 된다.

2.2 무동력 유체작동에 관한 새로운 개념

본 논문에서는 외부동력을 사용하지 않고 표면장력에 의해 구동되는 유체작동에 관한 기초연구로 기존의 방법과는 다르게 유체의 응집력과 부착력 사이의 힘의 불균형 특성을 최대한 이용하는 아래와 같은 원리에 기초하여 액적을 이송시킬 수 있는 새로운 개념을 제안하고자 한다.

잘 알려진 바와 같이 액체분자와 고체분자들 사이의 힘은 상호간에 벽면부착력을 일으킨다. 만일 벽면 부착력이 액체분자들 사이의 응집력(cohesive force)보다 큰 친수성 표면에 액적이 놓이면 액체분자는 벽면(표면) 쪽으로 몰려 결과적으로 표면을 적시게 되어 접촉면적이 증가하는 경향이 있다. 이와는 반대로 벽면 부착력이 액체분자들 사이의 응집력보다 작은 소수성 표면에 액적이 놓이면 액체분자는 서로 뭉치려 하여 결과적으로 액적은 오그라들려고 하여 접촉면적이 감소하는 경향이 있다.

만일 Fig. 1(a)에 보인 바와 같이 단순하게 친수성과 소수성 표면으로 구성된 복합표면 경계면에 반구형 액적을 놓으면, 소수성 표면 위의 액

적은 응집력이 부착력보다 커서 힘이 왼쪽 친수성 표면쪽으로 작용하고 친수성 표면위의 액적은 응집력이 부착력보다 커서 역시 힘이 왼쪽으로 작용하게 되므로, 유체의 응집력과 부착력 사이의 힘의 불균형 특성을 최대한 이용할 수 있게 될 것이다. 따라서 시간이 경과함에 따라 액적은 표면과 만나는 계면에서의 강한 비평형상태로 인해 소수성 표면에서는 계면이 액적 안쪽으로 파고들고 친수성 표면에서는 계면이 액적 바깥쪽으로 퍼져 나가려고 할 것이므로, 결과적으로 액적 계면에서 곡률의 심한 비균일 분포를 만들게 되어 이것이 액적 전체에 강한 비평형 상태를 만들고 액적 내부(운동)에너지를 증가시키면서 액적은 친수성 표면 쪽으로 이동할 것이다(Fig. 1(b)). 액적이 소수성 표면을 벗어나면 Fig. 1(c)에 나타난 바와 같이 액적의 계면은 전체적으로 친수성 표면의 특성을 가지게 되나 액적 오른쪽 표면과의 계면에서 다시 오른쪽으로 움직이려고 하나, 소수성 표면으로 인해 정지되며 이로 인해 결과적으로 왼쪽으로 미는 반작용 힘이 작용되어 이것이 왼쪽 표면과의 계면에서의 부착력에 의한 왼쪽 친수성 표면으로의 움직임을 가속화시키며, 액적 내부 에너지는 최댓값을 가질 것이다. 이후 시간과 더불어 이 반작용 힘이 사라지므로 액적 내부 에너지는 급격히 감소하기 시작하며, 액적은 액적 내부의 불균일 압력분포를 가진 비평형상태로 인해 양쪽으로 퍼지는 형태로 되어 Fig. 1(d)와 같이 과도하게 신장된 형태로 변할 것이다. 그런 다음 액적은 액적 내부의 비평형상태를 점차 해소시키면서 움직이던 방향으로 이동하다 평형상태에 도달하면 움직임을 멈추게 될 것이다 (Fig. 1(e)).

위에 기술한 이송원리에 기초하여, 본 연구에서 제안하는 유체작동을 위한 액적이송에 대한 새로운 개념은 표면을 친수성과 소수성 표면의 복합표면으로 단순하게 구성하고 액적을 이 경계면에 놓음으로써 유체의 응집력과 부착력 사이의 힘의 불균형 특성을 최대한 이용하는 것으로, 결과적으로 액적 계면에서의 곡률의 심한 비균일 분포로 인해 액적이 평형을 이루지 못하는 강한 비평형상태를 야기한 후 평형상태로 변하는 동적 과정을 통해서 액적을 이송시키는 것이다. 이 새로운 개념은 동력을 사용하지 않고 액적 안팎에서 발생하는 비평형 Laplace 압력을 이용하는 면

에서는 기존의 개념과 유사하나, 기존의 개념이 비평형 Laplace 압력을 표면 습윤성 기울기 차이로 야기하기 때문에 주로 표면과 접하는 계면 부근에서만 비평형 Laplace 압력이 생성되는데 반해, 새로운 개념은 표면 습윤성 기울기가 극단적으로 다른 친수성과 소수성 표면으로 구성된 복합표면 경계면에 액적을 놓음으로써 유체의 응집력과 부착력 사이의 힘의 불균형 특성을 이용하기 때문에 액적 전체 계면 안팎에 강한 비평형 Laplace 압력을 생성시킬 수 있다. 또한 본 연구에서 제안한 유체작동을 위한 새로운 액적이송 장치는 단순하게 친수성과 소수성 표면으로 구성된 복합표면을 구성하고 액적을 이 경계면에 놓는 것으로 이 개념을 적용한 마이크로 장치는 제작 면에서도 기존의 방법보다 용이하므로, 이 개념의 가능성이 입증된다면 마이크로 유체 시스템에서의 유체가송 기술개발에 크게 기여할 것으로 사료된다.

3. 해석대상 및 수치해석 방법

3.1 해석 대상

본 연구에서 제안한 액적이송에 대한 새로운 개념에 관한 실험적 및 해석적 관련 연구가 현재 전무하기 때문에 여기서는 간단한 해석대상을 선택하고 이에 대한 수치해석을 통해 이 개념의 타당성을 입증하고자 한다.

해석대상은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 친수성 표면과 소수성 표면 경계에 중심을 둔 반원통형 액적으로, 초기에 표면(벽면)과의 접촉각을 90° 로 한 후, 이 액적이 명기된 접촉각(소수성 표면에서 $\theta=135^\circ$, 친수성 표면에서 $\theta=45^\circ$)을 가진 친수성/소수성 표면상에서의 시간에 따른 움직임을 파악하는 초기 경계치 문제이다.

본 연구에서는 액적 움직임에 대한 새로운 개념을 입증하고 기본적인 메커니즘을 파악하기 위한 목적 하에 실제 액적 움직임은 3차원 문제이나, 이 문제를 2차원 문제로 가정하고 반경 $R=0.002$ m인 반원통형 물 액적에 대해 수치해석한다. 또한 일반적으로 액적이송 문제에서 특히 친수성 표면의 높은 접촉각 히스테리시스(contact angle hysteresis)는 결과에 큰 영향을 줄 수 있는 인자라고 알려져 있으나, 접촉각 히스테리시스가 주로 표면 거칠기나 표면 습윤성 기울기에 크게 영향을 받는다는 등 아직 명확히 정립되어 있지

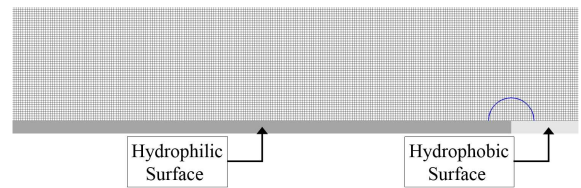


Fig. 2 Calculation domain and grid system with initial droplet shape

않고, 본 연구에서와 같은 액적이송 문제에 적용할 연구결과도 저자가 알고 있는 한 전무하다. 따라서 새로운 개념을 입증하고 기본적인 메커니즘을 파악하기 위한 것이 목적인 본 연구에서는 동적 접촉각의 영향을 고려하지 않고, 향후 연구 과제로 남기기로 한다.

해석공간은 Fig. 2와 같이 수평방향으로 0.05 m, 수직 방향으로 0.010 m이며, 격자계는 격자민감도 테스트를 거친 후 최종적으로 등간격 격자계로 12,500(250×50) 개의 제어체적을 사용하였다. 초기에 반원통형 액적 중심은 $x=0.044$ m에 놓여 있으며, $x > 0.044$ m 표면은 소수성 표면이고 $x < 0.044$ m 표면은 친수성 표면이다. 특히 초기상태에서 액적이 부분적으로 채워지는 셀에 대해서는 이 셀을 다시 1만개의 작은 셀로 나누어 액적이 차지하는 분율, 즉 VOF(Volume of Fluid) 값 α 를 정확히 산정하였다. 계산영역의 경계조건은 바닥면만 벽면조건이고, 나머지 경계는 압력경계로 설정하였다. 또한 본 연구에서는 실제 물 액적을 상정하고 배경 유체는 공기로 가정하였으며, 표면장력 계수 σ 는 7.0×10^{-2} N/을, 시간스텝 $\Delta t = 5 \times 10^{-6}$ s를 사용하였다. 참고로 이 경우 대표속도 및 대표길이를 각각 $U = \sqrt{\sigma/(\rho_w R)}$ 및 $L = R$ 로 정의할 때, $Re \approx 375$ 이고 $Fr \approx 1.34$ 이며, 대표속도로 약 50이 되는 0.5 s까지 계산하였다.

3.2 수치해석방법

수치해석은 Myong and Kim⁽⁶⁾ 및 Myong⁽⁷⁻⁹⁾이 개발한 비정렬격자계 및 체적포착법을 채택한 VOF(Volume of Fluid) 방법을 사용하는 수치해석 방법(PowerCFD 코드)에 비정렬격자계에 적용할 수 있도록 제안된 표면장력에 대한 CSF(Continuum Surface Force) 모델 및 벽면부착 경계조건 모델을 삽입⁽⁶⁾하여 수행하였다. 참고로 PowerCFD 코드는 일반 상용 CFD 코드와 같이

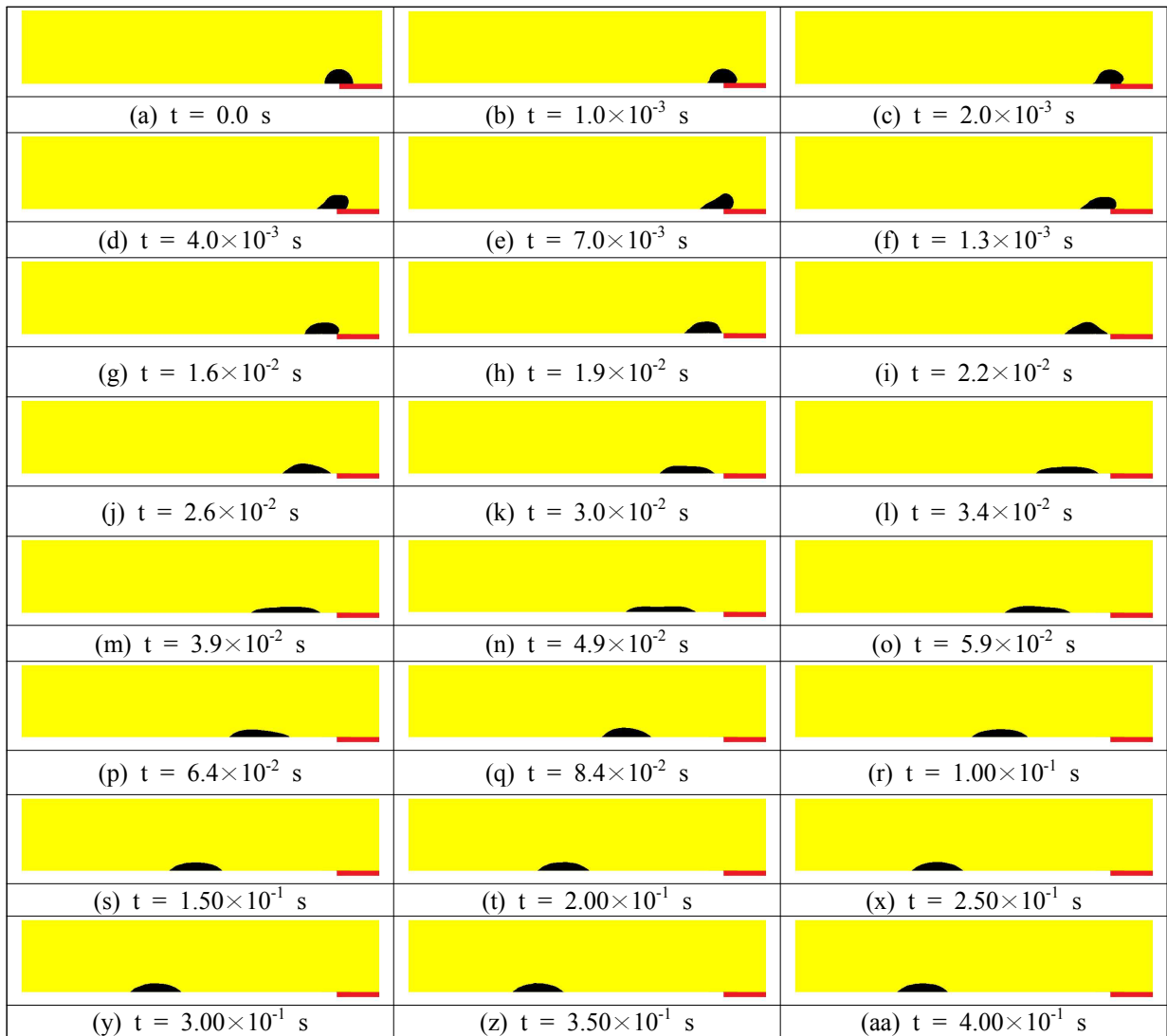


Fig. 3 Time evolution of droplet movement and shape at several times; $Re = 375$, $Fr = 1.34$, density ratio=1000

비정렬 셀 중심방법을 채용하고 압력수정방법에 기반을 둔 3차원 유동해석방법^(11,12)과 자유표면 해석을 위한 체적포착법에서 크게 문제가 되는 번짐현상과 같은 계면의 비물리적인 변형 및 수치확산 문제를 크게 개선한 것으로 알려진 HR (High Resolution)도식인 CICSAM⁽¹³⁾(Compressive Interface Capturing Scheme for Arbitrary Meshes)을 도입하고 있다. 이 CICSAM은 기본적으로 Donor-Acceptor 방법의 개념으로부터 출발하는 것으로, 해의 안정성은 보장하지만 수치 확산 및 번짐현상이 심한 상류차분도식과 한정성은 유지하지 않으나 급격한 기울기를 가지는 경계면을 잘 보존해주는 특성을 가진 하류차분도식을 셀

면과 유동의 움직임 방향이 이루는 각을 활용하여 두 가지 도식을 혼합하여 나타낸 형태이다.

구체적인 수치해석 방법은 각 시간스텝마다 먼저 VOF 값 α 에 대한 지배방정식을 풀어 VOF 장(field)의 α 값들을 새롭게 구한다. 다음으로, 이 α 값들을 사용하여 국소 물성값인 밀도 ρ 와 점성계수 μ 값을 계산한다. 마지막으로 비정렬격자계에 적용할 수 있도록 제한된 벽면부착 경계 조건 모델과 함께 표면장력에 대한 CSF (Continuum Surface Force) 모델을 사용하여 표면장력에 의한 단위 체적당 힘을 구한 후, 질량보존 및 운동량보존식을 유동해석 코드를 사용하여 풀게 된다.⁽¹⁰⁾

4. 해석결과 및 고찰

본 수치해석방법의 유효성을 확인하기 위해 액적의 전체 체적변화를 살펴보았다. 본 수치해석 결과는 비교적 성긴 격자를 사용하였음에도 불구하고 시간이 경과해도 초기의 경계가 퍼지거나 하는 현상이 거의 없으며, 약 100,000 시간 스텝이 지난 후에도 처음 액적의 전체체적에 대해 0.3 %의 매우 작은 오차를 가지면서 질량보존을 잘 만족시켜 주고 있어, 본 수치해석방법의 유효성 및 정확성을 입증해 주고 있다.

시간에 따른 액적의 움직임 및 형상 결과를 Fig. 3에 나타냈다. 그림에서 아래 오른쪽 굵은 선으로 표시한 부분이 소수성 표면이고, 나머지 부분이 친수성 표면이며, VOF 값 $\alpha \geq 0.5$ 인 부분을 액적으로 나타냈다. 결과를 보면 액적은 초기에 상반되는 특성을 가진 표면의 벽면부착력으로 인해 양쪽 표면의 계면에서 극단적인 비평형상태를 야기하여 친수성 표면에서는 부착력이 응집력보다 강해 퍼지고, 소수성 표면에서는 응집력이 강해 오그라드는 양상을 보이며 다양한 형상변화를 일으키며 변형되면서 왼쪽(친수성 표면 쪽)으로 움직이고 있음을 알 수 있다(Fig. 3(a)-(f)). 이것을 좀 더 자세히 살펴보면 소수성 표면에서는 응집력이 벽면부착력보다 커서 이로 인해 액적의 소수성 표면과의 계면이 오그라들며 왼쪽으로 이동한다. 이와 함께 소수성 표면 위쪽에서 곡률이 점점 커져 초기에 소수성 표면 부근에 발생된 높은 압력이 소수성 표면 위쪽 액적 전반에 걸쳐 작용하며 빠르게 곡률을 완화시키는 형상으로 변화되고 있다. 반면 친수성 표면에서는 벽면부착력이 응집력보다 강해 액적의 친수성 표면과의 계면에서는 퍼지며 왼쪽으로 이동하나, 친수성 표면 위쪽의 곡률이 상대적으로 작아 결과적으로 소수성 표면 위쪽에서의 비평형 상태로 인한 변화에 비해 형상 변화가 상대적으로 느리게 진행되다가(Fig. 3(a)-(d)), 액적의 심한 형상 불균일을 수정하기 위해 액적 전반에 대한 형상 변화를 수반하게 됨을 알 수 있다(Fig. 3(e)-(g)). 이러한 과정은 액적의 오른쪽 표면과의 계면이 소수성 표면을 벗어나는 시간까지 진행되며 액적은 소수성 표면 계면 부근을 제외하고는 어느 정도 볼록하며 매끄러운 형상을 만들고 있다.

액적의 오른쪽 표면과의 계면이 소수성 표면을 벗어나면, Fig. 3(h)-(k)에서 보는 바와 같이 액적

은 전체적으로 친수성 표면의 특성을 가지게 되어 액적 오른쪽 표면과의 계면에서 다시 오른쪽으로 작용하려고 하나, 소수성 표면으로 인해 정지되며 이로 인해 결과적으로 왼쪽으로 미는 반작용 힘이 작용되어 이것이 왼쪽 벽면과의 계면에서의 부착력에 의한 왼쪽으로의 움직임을 가속화시키며 액적은 전체적으로 넓게 퍼지는 형상을 가짐을 알 수 있다. 또한, 이 과정은 액적이 과도하게 신장된 상태로까지 진행된 후(Fig. 3(l)-(n)), 다시 평형상태보다 표면과의 접촉면적이 작은 수축된(볼록한) 형상으로 회귀하려는 현상을 반복하며(Fig. 3(o)-(y)) 시간과 함께 점차 느려지기는 하나 평형상태에 도달할 때까지 왼쪽으로 움직여 가는 것을 확인할 수 있다. 참고로 이 과정에서의 구동 메커니즘은 잘 알려진 원형 액적표면이 변형되었을 때 액적 표면에 그것의 평형상태 주위로 진동시키는 모세관파(capillary wave)가 야기된다는 것과 유사하게 비평형 액적 표면에서 발생하는 모세관파로 설명할 수 있다고 사료된다.

또한 Fig. 3의 결과를 보면 액적이 약 0.3초 후에 평형상태에 도달함을 나타내고 있으며, 전체 액적이송 거리가 액적 지름의 약 7배(약 2.8 cm)이고, 평균속도는 약 90 mm/s이다. 이 결과는 해석대상이 달라 정확한 정량적 비교는 할 수 없으나 전체 액적이송거리가 액적의 직경수준 정도이고 액적의 평균속도가 62.5 mm/s라고 보고하고 있는 이전연구⁽¹⁾보다도 액적이송 능력이 우수하다고 할 수 있다. 참고로 $t=0.5s$ 까지의 계산결과를 비교하여 보면 결과에 영향을 미칠 정도는 아니지만 액적이 평형상태 주위로 아주 미세하게나마 진동하고 있음이 확인되었는데, 이것은 VOF 방법에 CSF 모델을 사용하였을 경우 필연적으로 발생하는 기생흐름(parasite current)과 비교적 성긴 격자에 기인하는 것으로 사료된다.

이상의 수치해석 결과는 본 연구에서 제안하는 유체작동을 위한 액적이송에 대한 새로운 개념 및 성능의 우수성을 명확하게 입증해 주고 있다고 사료된다.

5. 결론

본 논문에서는 외부동력을 사용하지 않고 표면장력에 의해 구동되는 유체작동에 관한 기초연구로 점진적으로 표면 습윤성 기울기를 변화시키는 기존의 연구와 달리, 표면을 표면 습윤성 기울기

가 극단적으로 다른 친수성과 소수성 표면의 복합표면으로 단순하게 구성하고 액적을 이 경계면에 놓음으로써 유체의 응집력과 부착력 사이의 힘의 불균형 특성을 최대한 이용함으로써, 결과적으로 액적 계면에서의 곡률의 심한 비균일 분포로 인해 액적이 평형을 이루지 못하는 강한 비평형상태, 즉 액적 전체 계면 안팎에 강한 비평형 Laplace 압력의 생성을 야기한 후 평형상태로 변하는 동적과정을 통해서 액적을 이송시킬 수 있는 새로운 개념을 제안하였다.

또한 이 새로운 개념을 입증하기 위해 해석대상으로 친수성 표면과 소수성 표면 경계에 중심을 둔 반원통형 액적을 선택하고, 초기에 표면(벽면)과의 접촉각을 90°로 한 후, 이 액적이 명기된 접촉각(소수성 표면에서 $\theta=135^\circ$, 친수성 표면에서 $\theta=45^\circ$)을 가진 친수성/소수성 표면상에서의 시간에 따른 움직임을 파악하는 초기 경계치 문제에 대한 수치해석을 수행하였다.

연구결과, 본 연구에서 제안하는 액적이송에 대한 새로운 개념 및 성능의 우수성이 명확하게 입증되었다. 따라서 이 개념을 적용한 유체작동을 위한 마이크로 장치는 제작 면에서도 기존의 방법보다 용이하므로, 마이크로 유체 시스템에서의 유체가송 기술개발에 크게 기여할 것으로 사료되므로, 이에 관한 실험적 연구가 이루어지기를 기대한다.

향후 본 연구에서 제안한 액적이송 메커니즘을 확립시키기 위해 수치해석 방법을 포함하여 액적 내 압력분포, 속도분포 및 내부 에너지 변화 등에 관해 보다 상세한 분석을 수행할 예정이다. 또한 실제 액적에 대한 액적모양, 초기 액적 위치, 액적 크기, 서로 다른 친수성/소수성 표면 평형 접촉각, 동적 접촉각 등의 영향에 대한 연구를 진행시킬 예정이다.

후 기

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20134040200580)이다.

참고문헌 (References)

(1) Yang, J. T., Chen, J. C., Huang, K. J. and Yeh, J. A., 2006, "Droplet Manipulation on a

Hydrophobic Textured Surface with Roughened Patterns," *J. Microelectromechanical Systems*, Vol. 15, No. 3, pp. 697~707.

(2) Shen, W., Kim, J. and Kim, C. J., 2002, "Controlling the Adhesive Force for Electrostatic Actuation of Microscale Mercury Drop by Physical Surface Modification," in *Proc. IEEE Int. Conf. MEMS*, Las Vegas, NV, Jan., pp. 52~55.

(3) He B. and Lee, J., 2003, "Dynamic Wettability Switching by Surface Roughness Effect," in *Proc. IEEE Int. Conf. MEMS*, Kyoto, Japan, Jan., pp. 120~123.

(4) Liao, Q., Qang, H., Zhu, X. and Li, M., 2006, "Liquid Droplet Movement on Horizontal Surface with Gradient Surface Energy," *Science in China Series E: Technological Sciences*, Vol. 49, No. 6, pp. 733~741.

(5) Ito, Y., Heydari, M., Hashimoto, A., Konno, T., Hirasawa, A., Hori, S., Kurita, K. and Nakajima, A., 2007, "The Movement of a Water Droplet on a Gradient Surface Prepared by Photodegradation," *Langmuir*, Vol. 23, No. 4, pp. 1845~1850.

(6) Myong, H. K. and Kim, J. E., 2006, "A Study on an Interface Capturing Method Applicable to Unstructured Meshes for the Analysis of Free Surface Flow" *KSCFE J. of Computational Fluids Engineering*, Vol. 11, No. 4, pp. 14~19.

(7) Myong, H. K., 2008, "Comparative Study on High Resolution Schemes in Interface Capturing Method Suitable for Unstructured Meshes" *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 32, No. 1, pp. 23~29.

(8) Myong, H. K., 2009, "Numerical Simulation of Multiphase Flows with Material Interface due to Density Difference by Interface Capturing Method" *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 33, No. 6, pp. 443~453.

(9) Myong, H. K., 2011, "Numerical Simulation of Surface Tension-Dominant Multiphase Flows with Volume Capturing Method and Unstructured Grid System" *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 35, No. 7, pp. 723~733.

(10) Myong, H. K., 2012, "Numerical Study on

- Multiphase Flows Induced by Wall Adhesion"
Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, Vol. 36, No. 7, pp. 721~730.
- (11) Myong, H.K. and Kim, J., 2005, "Development of 3D Flow Analysis Code using Unstructured Grid System(1st Report, Numerical Method)," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 29, No. 9, pp. 1049~1056.
- (12) Myong, H. K. and Kim. J., 2006, "Development of a Flow Analysis Code using an Unstructured Grid with the Cell-Centered Method," *J. of Mechanical Science and Technology (KSME Int. J.)*, Vol. 20, No. 12, pp. 2218~2229.
- (13) Ubbink, O., 1997, Numerical Prediction of Two Fluid Systems with Sharp Interface, PhD Thesis, University of London.