2007년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2007. 7. 18 - 20

# 공기주입기로 구동되는 랩온어칩 내의 유동 해석과 미세 유로 설계

강태호, 박신욱, 양상식
아주대학교 전자공학부

# Flow Analysis and Design of a Microchannel in a Lab-on-a-chip actuated with an Air Bladder

Tae Ho Kang, Sin Wook Park, Sang Sik Yang
Division of Electrical & Computer Engineering, Ajou University

**Abstract** - 휴대용 면역진단 시스템을 구현하기 위하여 설계된 공기주입기로 구동되는 랩온어칩 내의 유체 유동을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 해석하고, 문제점을 보완할 수 있는 구조로 랩온어칩을 재설계하였다. 공기주입기에서 흘러나오는 공기를 이용해 완충액 저장고 내에 있는 완충액을 토출시킬 때 다량의 기포가 발생함을 시뮬레이션 결과를 통해 알 수 있었다. 완충액 저장고의 내부에 계단형 구조를 삽입함으로서 완충액 이송 시 형성되는 기포를 상당히 억제할 수 있었다. 또한 계단형 구조는 유선을 역행 방지판 쪽으로 분산시켜 역행 방지판의 효율을 높일 것이다.

## 1. 서 론

면역 진단이 가능한 초소형 센서가 내장된 랩온어칩과 휴대 가능한 크기의 외부 인터페이스로 이루어진 휴대용 면역 진단 시스템은 일상생활에 누구나 특별한 교육 없이 손쉽게 사용자의 건강 상태를 진단하도록 구현된 장치이다. 면역 진단에 사용되는 미량의 시료를 효과적으로 분석하기 위해, 전기화학적 방법을 이용한 센서 부분과 미세 유체 소자를 통합하여 시료의 이송 및 분석이 일괄적으로 칩 안에서 제어되는 랩온어칩이 주목받고 있다. 미세 유체 소자는 외부 구동력을 필요로 하는 능동형 장치와 외부 구동력을 필요로 하지 않는 수동형 장치로 구분된다. 능동형 장치는, 외부 구동력을 이용하며, 제조 공정이 복잡하고, 집적화시키기 어려우며, 제조원가가 비싸다. 이러한 특징을 고려할 때 능동형 장치는 휴대용 랩온어칩으로 이용하기 부적절하다.[1] 원터치형 공기주입기(one-touch type air bladder)는 공압이나 유압 등의 외부 구동력을 필요로 하지 않으며 전력 소모가 전혀 없기 때문에, 휴대용 랩온어칩에 적용하기에 적당하다.[1] 이러한 원터치형 공기주입기와 수동형 장치인 역행 방지판(check valve)을 집적시키면 외부 구동 력 없이 미세 유체를 효율적으로 구동할 수 있다.[2]

그러나 원터치형 공기주입기는 사람의 손으로 직접 조작해야 하므로 구동 과정에서 많은 변수가 생긴다. 신뢰성 있는 일회용 원터치형 랩온어칩을 위해서 공기주입기의 구동 시 이송되는 유량을 정량화하고 기포의 발생을 억제해야 한다. 이를 위해서 먼저 공기주입기에서 흘러나오는 공기과 완충액 저장고 내에 있는 완충액과의 유동 변화에 대해 컴퓨터 시뮬레이션으로 검증해 볼 필요가 있다.

본 논문은 이전에 제작된 일회용 원터치형 랩온어칩의 공기주입기와 완충액 저장고 사이에서 일어나는 일련의 과정을 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 통해 보여주고 있다. 시뮬레이션을 통해 랩온어칩의 문제점을 분석하고, 분석 결과를 기초로 랩온어칩의 구조를 재설계 하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 랩온어칩의 구조와 문제점

그림 1은 이전에 제작된 일회용 원터치형 랩온어칩의 구조도이다.[1] 구조도에서 보여진 것처럼 랩온어칩은 원터치형 공기주입기, 역행 방지판, 완충액 저장고, 반응실, 주입구, 방출구 등으로 이루어져 있다. 랩온어칩의 동작은 그림 2에 도시한 것처럼 사람의 손을 통해 인가되는 압력에 의해 원터치형 공기주입기의 막이 변화되고, 줄어든 내부 부피만큼 주입기 내부에 있던 공기가 토출되어 완충액이 이송되는 일련의 과정으로 진행된다. 좌측의 원터치형 공기주입기에서 생성된 공압은 완충액 저장고에 있는 완충액을 반응실로 밀어주며, 역행 방지판은 완충액이 주입구로 역류하는 것을 막는다. 공기주입기의 구동이 완료되면 밑에 있던 역행 방지판이 열리고 공기가 흘러들어와 완충액 저장고를 채움으로서 일련의 과정이 완료된다.

그러나 실제 측정 결과(그림 3), 공기주입기에서 공압이 인가될 때 저장된 완충액의 상당량이 유동 없이 머물러 있었다. 이로 인해서 발생되는 문제점은 반응실에 있는 면역 검출 전극이 충분한 양의 완충액으로 세척되지 않음으로 인한 노이즈 형성과 신호크기 감소 등 신호의 불안정성을 유발시킨다는 것이다. 완충액의 전달이 충분하지 못한 원인은 원터치형 공기주입기를 구동할 때마다 생기는 무작위 변수 때문이다. 이러한 변수를 시뮬레이션을 통해 분석하였다.

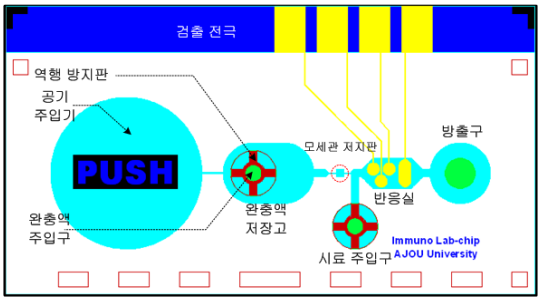



그림 1. 휴대용 면역진단 시스템의 구조도

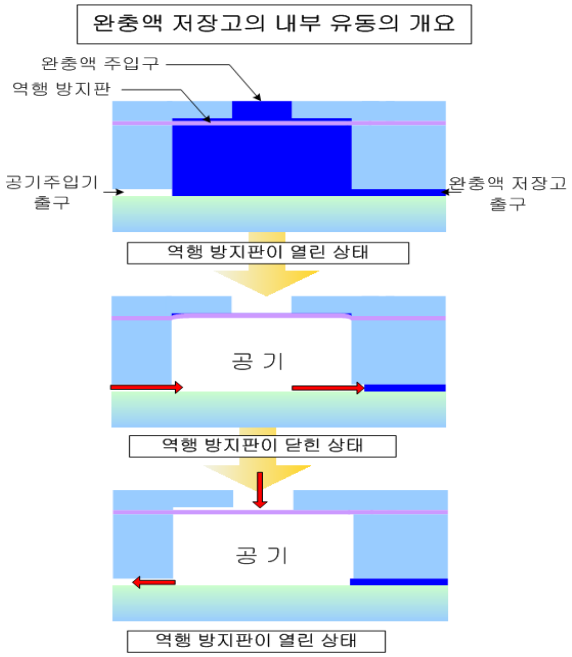



그림 2. 완충액 저장고의 내부 유체 유동 개요

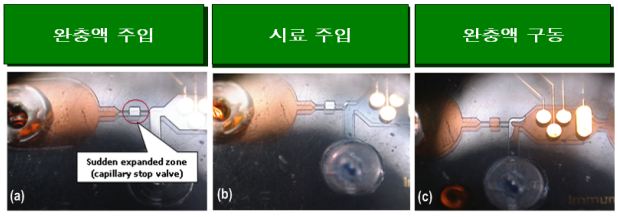



그림 3. 공기주입기 이용한 완충액 구동 실험 결과

### 2.2 완충액 저장고 내부의 유체 유동 시뮬레이션의 조건

원터치형 공기주입기의 구동에 관한 시뮬레이션 결과(COMSOL Multiphysics 3.2)는 그림 4와 같다. 시뮬레이션에 이용한 PDMS의 영률은 7.3 × $10^5$ Pa이다. [3] 그림 4(a)는 공기주입기의 상부에 200 kPa의 압력을 가했을 때의 결과이며, 그림 4(b)는 압력에 의해 변형된 공기주입기 윗면을 간략한 식으로 근사한 그래프이다. 공기주입기를 구동하였을 때 토출되는 공기의 총 토출량은 그림 4(b)를 적분함으로서 구할 수 있으며, 그 값은 78.54 $mm^3$ 이다. 공기주입기에 압력이 인가되는 시간을 0.2초로 근사하면 공기주입기를 구동할 때 생기는 부피유량은 392.7 $mm^3/s$ 이 된다. 부피유량은 완충액 저장고 내부의 유체 유동 시뮬레이션의 초기 조건이 된다.

다양한 형태의 완충액 저장고에 일정한 부피유량을 초기조건으로 적용했을 때, 발생하는 공기와 완충액 사이의 계면 변화와 토출되는 완충액의 상태를 컴퓨터 시뮬레이션(CFD-ACE+ 2007, ESI CFD Inc)을 통해 알아보았다. 시뮬레이션에 적용된 완충액은 물이며, 완충액 주입구의 역행 방지판이 충분한 힘으로 닫혀있다는 가정 하에 진행하였다. 이는 시뮬레이션의 목적이 공기주입기와 역행 방지판 사이의 상호작용이 아닌, 완충액을 효과적으로 밀어주기 위한 완충액 저장고의 설계에 있기 때문이다. 표 1은 시뮬레이션에 사용한 유체의 세부 특성을 나타낸다.

**표 1. 시뮬레이션의 세부 조건**

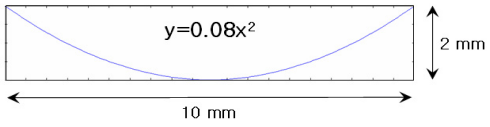
| | 밀 도($kg/m^3$) | 점 성($m^2/s$) | 표면 장력(N/m) |
|---|---|---|---|
| 공 기 | 1.164 | 1.846 × $10^{-5}$ | |
| 물(완충액) | 997 | 8.55 × $10^{-4}$ | 0.0717 |
| 구동 압력 | 200 kPa | 온 도 | 300 K |

### 2.3 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 그림 5(a)를 전체 구조로 한, 서로 다른 단면의 완충액 저장고에 대하여 진행하였다. 구동 압력은 표 1에 제시한 것처럼 200 kPa을 가했으며, 약 370 $mm^3/s$(=370 μg/s)의 부피유량이 방출구를 통해서 나오는 것을 그림 5의 시뮬레이션에서 확인하였다.

그림 6은 방출구에서 흘러나가는 물의 질량유량과 물과 공기의 질량 백분율의 그래프를 나타낸다. 그림 6(a)의 좌측 그래프처럼 완충액 저장고를 빠져나가는 물의 질량은 구동 초기단계에서 약 370 μg/s로 일정하므로 일정한 압력이 인가되면 일정한 유량이 나온다는 것을 알 수 있다. 시간이 흐름에 따라 물의 질량유량은 요동하는데, 이는 물의 부피유량의 줄어들고, 줄어든 양만큼 공기가 기포로서 빠져나가기 때문이다.

(a) 공기주입기 구동 시뮬레이션




(b) 공기주입기 윗면의 근사 그래프

**그림 4. 원터치형 공기주입기의 구동 시뮬레이션**

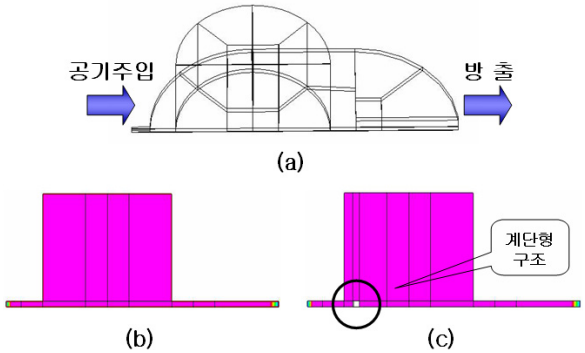
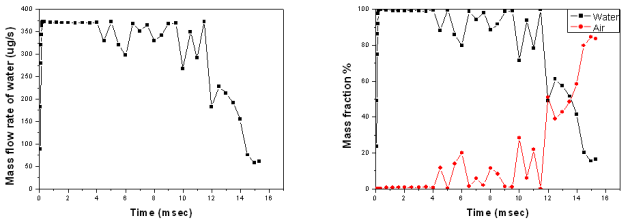
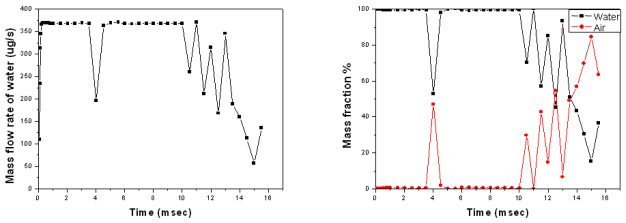



**그림 5. 시뮬레이션 구조도**
**(a) 완충액 저장고의 입체도**
**(b) 완충액 저장고의 단면도**
**(c) 계단형 구조가 삽입된 완충액 저장고의 단면도**

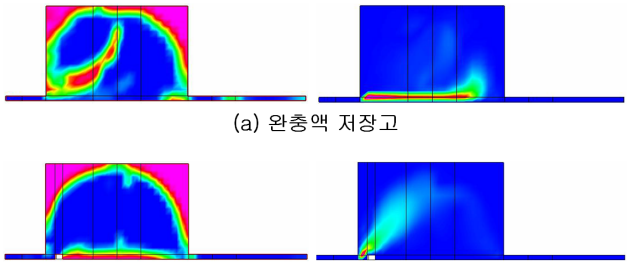



(a) 완충액 저장고




(b) 계단형 구조가 삽입된 완충액 저장고

**그림 6. 시간에 따른 방출구에서의 물의 질량유량(좌측)과 물과 공기의 질량 백분율(우측) [질량유량 단위 : μg/s]**



(a) 완충액 저장고

(b) 계단형 구조가 삽입된 완충액 저장고

**그림 7. 물/공기 계면과 유속분포 시뮬레이션 ( 13 msec )**

물과 공기의 밀도 차는 약 1000배이므로 물의 부피유량이 줄어드는 양의 1000배에 해당하는 만큼 공기의 부피유량이 방출구를 통해 흘러나간다. 이러한 특징으로부터 그림 6의 질량유량의 요동은 완충액이 반응실로 이송되는 과정에서 생기는 기포로 생각할 수 있다. 그림 6(a)와 그림 6(b)를 비교할 때, 완충액 저장고에 삽입된 계단형 구조는 기포 발생을 억제하는 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 계단형 구조는 공기주입기에서 나오는 공압을 분산시켜 공기가 물을 가로질러 나가는 것을 막으므로 기포 생성을 억제한다. 계단형 구조의 삽입은 면역 진단의 신뢰성을 높일 수 있는 방법이 될 것이다.

계단형 구조는 그림 7에서 보여지는 것처럼 물과 공기의 계면을 안정적으로 형성한다. 그림 7의 유속분포 단면에서 보이는 것처럼 계단형 구조가 유선을 역행 방지판에 수직한 방향으로 편향시키며, 이러한 현상은 역행 방지판을 닫기 위한 최소 압력을 낮추어 원터치형 공기주입기 구동의 신뢰성을 높일 것으로 예상된다.

## 3. 결 론

본 연구에서는 공기주입기로 구동되는 랩온어칩 내의 유체 유동을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 해석하고, 해석된 결과를 통하여 보완된 랩온어칩을 설계하였다. 보완된 랩온어칩은 이전에 제작된 랩온어칩 보다 기포가 잘 발생하지 않으며, 유선이 역행 방지판 쪽으로 향하고 있어서 공기주입기의 효율을 높일 수 있을 것으로 예상된다. 차후 연구는 설계를 보완한 랩온어칩을 효과적으로 구현하여 이를 실험적으로 확인하는 것이다.

## [참 고 문 헌]

[1] 박신욱, 강태호, 이준황, 윤현철, 양상식, "PDMS 체크 밸브가 내장된 일회용 원터치형 랩온어칩", 제9회 한국 MEMS 학술대회 논문집, 139-142, 2007.

[2] Noo Li Jeon, et al, Biome. Microdevices, 4:2, 117-121, 2002.

[3] D. Amani, et al, 12th IEEE International Conference on MEMS, 1999, pp. 222-227