

고속솔레노이드 밸브를 이용한 비접촉 분주시스템

Non-contact dispensing system based on high speed solenoid valves

박성제(Sung Jea Park)

KOREATECH

Advanced Technology Research Center & School of Mechanical Engineering

Korea University of Technology and Education

psj7517@koreatech.ac.kr

요약

일반적으로 자동임상의료기기에서는 시린지 타입의 분주시스템이 사용된다. 그러나 이러한 시스템은 분주 과정에서 오염의 문제가 발생하기 쉽다. 상기 문제를 극복하고자 본 연구에서는 고속 솔레노이드 밸브를 기반으로 한 나노리터 급의 비접촉 분주시스템을 제안하였다. 해당 분주시스템에서는 압축공기를 통해 용기에 담긴 액체를 이동시키고, 해당 액체를 개방시간이 짧은 솔레노이드 밸브를 통해 토출한다. 토출된 액적의 부피는 공기의 압력, 노즐의 크기, 그리고 솔레노이드 밸브의 개방시간에 따라 조절될 수 있으며, 본 연구에서는 위의 공정조건에 따른 분주량을 체계적으로 조사하였다.

키워드: 비접촉 분주시스템, 고속 솔레노이드 밸브, 액적

Abstract

Generally, syringe type dispensing system is used in automated clinical laboratory instrument. But this system has contamination problem like "carry over" in dispensing or mixing process. In this regard, nanoliter-level dispensing system enabling non-contact is proposed by controlling high speed solenoids valves. In the present dispensing system, pressurized air transfers liquids from a reservoir to nozzles through tube via high speed solenoid valves, thus injecting liquid droplets into a well. The droplet volume depends on the air pressure, nozzle size and more importantly on the opening time of solenoid valves. This study reports dispensed droplet volume by each condition and phenomena at dispensing process.

Key words: non-contact dispensing system, high speed solenoid valve, droplet

* This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서론

액체를 목표 지점에 원하는 양을 정확히 분주/분배(dispensing)하는 것은 일반적인 실험실, 의료기기 분야, 반도체 또는 전자부품의 패키징(packaging)의 표면실장기술(SMT:surface mount technology)분야, 마이크로 패터닝(micro patterning)분야 등 연구, 의료, 산업분야에서 활용도가 높으며 필요성이 요구되고 있다. 특히 자동 임상 의료 검사에서 많은 활용이 되고 있는데, 현재 사용되는 자동 임상 의료검사용 유체 분주/분배기기의 경우 일반적으로 스텝핑모터(stepping motor)를 이용한 시린지(syringe) 펌프 시스템을 사용하기 때문에 분주 노즐(dispensing nozzle)의 접촉에 따른 교차오염(cross contamination) 혹은 캐리오버(carry over)의, 비싼 가격 등의 단점을 내재하고 있다. [1-3]

이러한 단점을 극복하고자 본 연구에서는 반응속도가 매우 빠르고 내구압력이 높은 소형 솔레노이드 밸브를 이용하여 분주시스템을 개발하고 이에 대한 평가를 실시하였다. 이러한 시스템은 기존의 시린지 형태의 분주기기에 비해 시약(reagent) 및 검체(sample)의 양을 줄일 수 있으리라 기대되며, 비접촉식으로 구동되기 때문에 교차오염을 원천적으로 방지할 수 있다.

II. 솔레노이드 밸브 기반 분주시스템의 개발

본 연구에서 구축하고자하는 분주시스템은 자동 임상의료기기에서 요구하는 빠르고 정확하게 소량의 액체를 분주하는 것을 목적으로 두고 있다. 이에 따라 검체 혹은 시약에 노즐이 닿지 않고 분주가 가능한 비접촉식 분주를 구현해야 하며, 이를 위해 고속 솔레노이드 밸브를 사용한 제팅(jetting) 방식을 사용하였다. 더불어, 검체 및 시약에 접촉하지 않는 시스템 액체(system liquid) 사용과 에어갭(air gap) 형성을 통해 밸브 내부의 교차오염을 방지하였다. 해당 분주 형태는 Innovadyne 에서 제시한 형태이다.[4] Fig.1 에 개발된 분주시스템에 대한 개략도를 도시하였다.

상기의 분주시스템을 제작하기 위해서 다양한 종류의 부품을 필요로 한다. 그 중에서도 특히 솔레노이드 밸브의 성능이 매우 중요하고 이 시스템에서는 3way 솔레노이드 밸브와 2way 고속 솔레노이드 밸브가 필요하다. 본 연구에서는 The Lee Company 의 3way 솔레노이드 밸브로 LFYA1218032H 를 사용하였고 고속 솔레노이드 밸브는 The Lee Company의 INKX0514300A를 사용하였다.(Fig.2 (a)) 고속 솔레노이드 밸브의 경우 제조사에서 제공된 내역은 반응속도가 1ms이내, 제한압력은

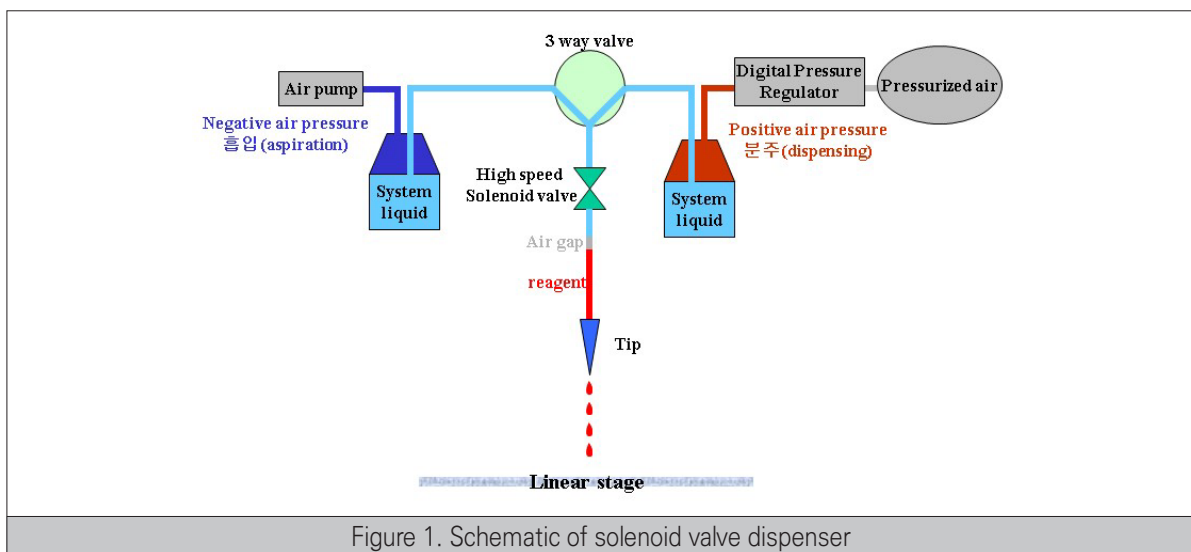
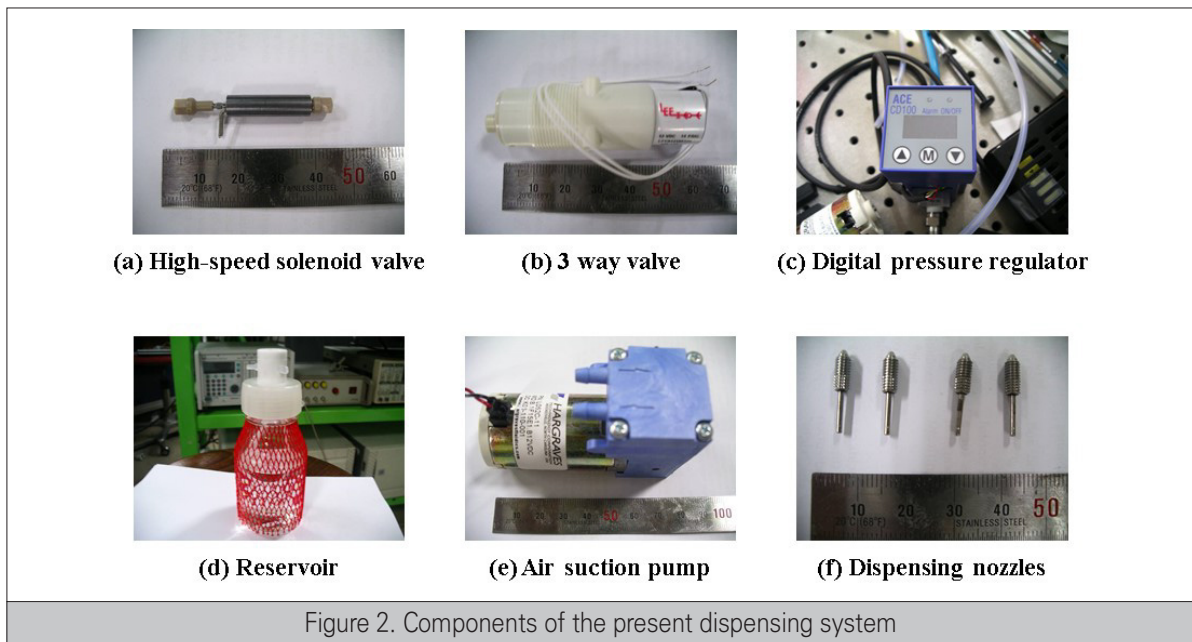


Figure 1. Schematic of solenoid valve dispenser

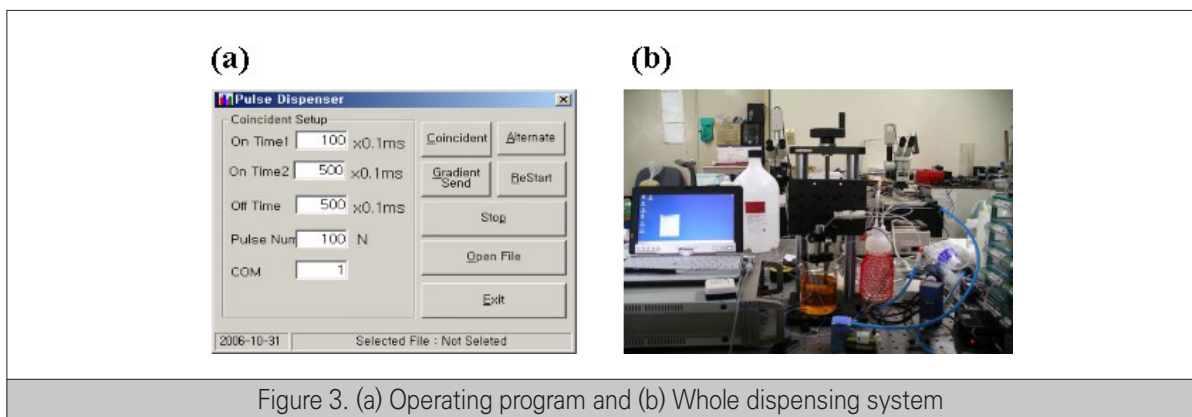


827kPa, 구동전압은 24V이다. 실험결과, 0.1ms까지 반응속도를 확인할 수 있었다. 3way 밸브의 경우 반응 속도가 20ms이내, 제한압력은 206kPa, 구동전압은 12V이다. (Fig.2 (b))

Fig.2(c)는 압축공기로 가압 시 정압을 유지시켜 주는 전자식 정압기이다. 분해능이 1kPa인 ACE사의 AP-200을 사용하였다. Fig.2(d)에 나타난 정압이 유지되고 시스템액체가 담겨있는 압력용기는 Omnifit사의 3283 bottle cap과 3408 reservoir를 사용하였다. Fig.2(e)의 흡입 시 사용되는 에어펌프는 Hargraves사의 H022C-11(-40kPa~-34kPa)을 사용하였으며, 튜브는 내경이 0.8mm인 것을 사용하였으며 노즐은 내경이 각 254 μ m, 190.5 μ m, 127

μ m인 노즐을 사용하였다.(Fig.2(f))

본 시스템은 솔레노이드 밸브의 제어에 의해 분주량과 흡입/분주 여부가 결정되므로 고속솔레노이드 밸브와 3way 솔레노이드 밸브의 on/off를 결정할 수 있는 제어회로를 제작하였다. 또한 이 회로는 컴퓨터의 RS-232 병렬포트(serial port)와 통신이 가능하게 하여 각 밸브의 구동시간을 조절할 수 있게 하였다. 구동시간은 고속 솔레노이드 밸브의 경우 0.1ms에서 1000ms까지 조절이 가능하며 이러한 고속 솔레노이드 밸브의 구동시간에 맞추어 3way 솔레노이드 밸브의 시간도 결정되게 프로그램을 구성 하였다. (Fig.3(a)) 위와 같은 구성요소들을 사용하여 Fig.3(b)과 같은 전체 시스템을 완성하였다.



III. 분주량 측정방법

현재까지 미세량의 액적의 부피는 측정하는 방법은 무게를 이용하는 방법[5], 형광물질(fluorescence)을 이용하는 방법 [3,5]과 액적의 접촉각(contact angle)을 이용하는 방법[6]이 사용되고 있다. 무게를 이용하는 방법은 액적의 무게가 너무 작으므로 수백 번 액적을 분주한 후 측정하고 분주 횟수로 전체 분주량을 나눔으로써 1회 분주량을 알 수 있다. 그러나 이는 분주동안의 증발이 일어남으로 그 정확도가 떨어진다. 형광물질을 이용하는 방법은 일정한 부피를 가진 용기(well)에 형광물질을 포함한 액체를 분주한다. 그래서 용기의 일정한 단면적에서 형광물질에 의해 발생하는 형광의 강도를 가지고 액체의 분주량을 측정하는 방법이다. 그러나 이 방법은 본 실험과 같이 일회 분주량이 nL단위일 경우 적합하지 않으며, 이러한 방법을 사용하기 위해서는 무게를 통한 측정방법과 같이 수회 분주한 후 측정하여야 한다. 접촉각을 이용하는 방법은 소수성을 가지는 표면에 분주하여 액적의 직경과 접촉각을 측정한다. 이를 통하여 액적의 부피를 계산하는 방법이다. 본 연구에서는 무게를 사용하는 방법과 접촉각을 사용하여 측정하는 방법을 사용하였다.

접촉각을 이용하는 방법은 위에 언급했듯이 소수성(hydrophobicity)을 가지는 표면에 액적을 분주하여 직경과 접촉각을 측정하는 방법이다. 이는 분주된 액적이 완전한 구형을 이룬다고 가정하고바다면과의 접촉각(θ)과 액적의 직경(d)을 측정한다. 측정된 접촉각과 직경을 통해 아래의 식(1)로 분주량(V)을 계산할 수 있다.

$$V = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^3 \left(\frac{2}{3} - \cos \theta + \frac{1}{3} \cos^3 \theta\right) \quad (1)$$

본 연구에서는 테프론 코팅된 글라스 판을 측정을 위한 소수성 표면으로 사용하였다. 테프론 코팅된 글라스 판은 약 90°의 접촉각을 가지고 있다.

무게를 이용하여 액체의 분주량을 측정하는 것은 액체의 밀도를 고려하여 측정하는 방법이다. 그러나 현재 출시되어 있는 정밀 저울(balance)의 경우 오차범

위가 ±0.03mg이고 0.05mg이상부터 측정이 가능하다. 그러므로 순수한 물의 분주량을 측정하는 경우, 밀도가 1mg/μL이므로 50nL에서 ±30nL의 분주량 오류를 가질 수 있다. 그러므로 본 실험에서는 이러한 오류를 없애기 위해 1000번을 분주하여 측정하였다. 그리고 1000 번을 분주하는 동안의 액체의 증발을 막기 위해 실험환경의 습도를 최대한 높게 유지시켰다. 1000번을 분주하는데 걸리는 시간은 약 50초 정도 소요되어 증발에 의한 오류를 최소화 할 수 있었다.

IV. 공정 변수에 따른 분주량

본 시스템의 제어변수인 압력, 노즐의 크기, 고속 솔레노이드 밸브의 개방시간에 따른 분주량을 조사하였으며, 사용된 액체는 증류수를 사용하였다. 압력에 따른 노즐크기 별로의 물의 분주 유량(flow rate)은 Fig.4에 나타난 것과 같다. 분주 유량은 고속 솔레노이드 밸브를 1초 동안 개방하여 실험하였다. 1초 동안 밸브를 열어 물의 무게를 측정함으로써 유량을 파악할 수 있었다.

실제 본 연구에서 목적은 Fig. 4에 나온 것처럼 수백 μL단위의 다량의 액체를 분주하는 것이 아니라 nL단위의 미세량을 분주하는 것에 있다. 그러므로 각 압력별로 최소 분주량을 Fig.5에 나타난 바와 같이 조사했다. 고속 솔레노이드 밸브의 개방시간을 제어가 가능한 최소시간인 0.1ms로 하고 실험하였다. 측정방법은 접촉각을 이용한 방법과 무게를 이

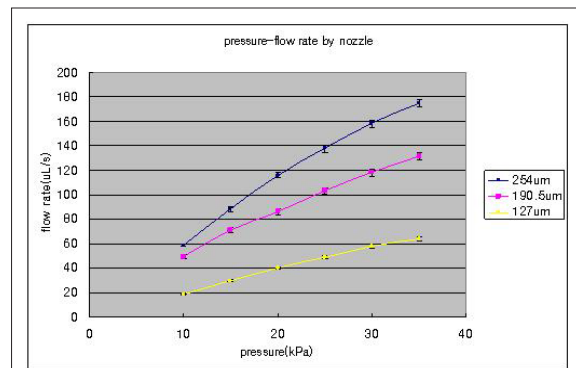


Figure 4. Pressure - flow rate by nozzle size

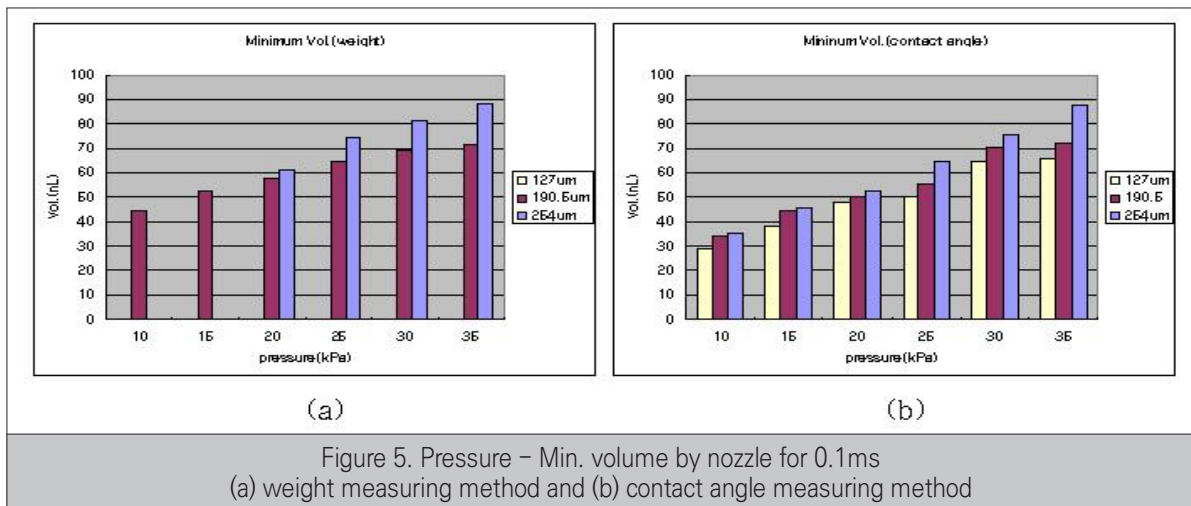


Figure 5. Pressure - Min. volume by nozzle for 0.1ms
(a) weight measuring method and (b) contact angle measuring method

Table 1. Valve opening time - volume experimental conditions

	reference condition	variation
valve opening time(ms)	2	0.1, 1, 4, 5, 10
nozzle size(μm)	190.5	127,254
pressure(kPa)	15,25	
measuring method	weight, contact angle measuring method	

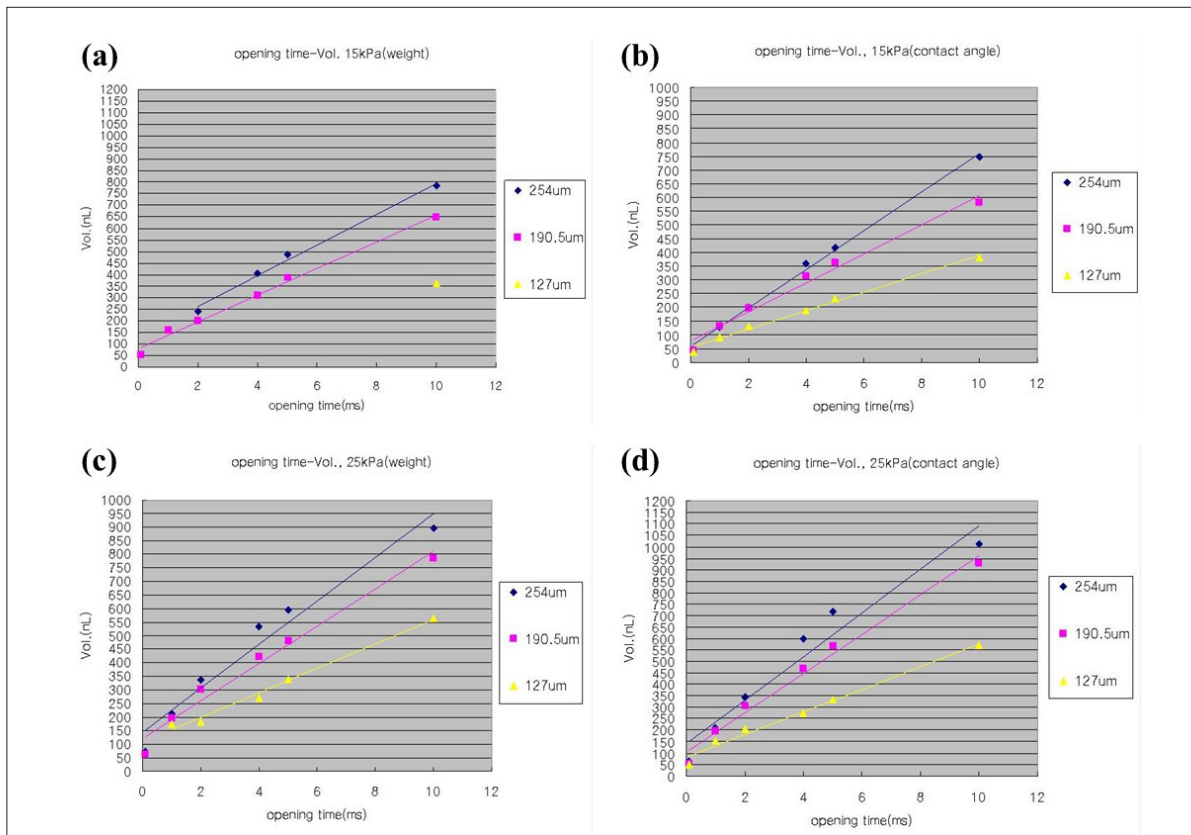


Figure 6. Dispensed water volume Vs. valve opening time by nozzles size
(a) pressure:15kPa, weight measuring, (b) pressure:15kPa, contact angle measuring,
(c) pressure:25kPa, weight measuring and (d) pressure:15kPa, contact angle measuring

액적의 양은 증가하는 경향을 보이고 노즐크기가 증가함에 따라 분주량을 증가한다. 무게 측정방법에서 127 μ m 노즐항목과 254 μ m노즐의 10ms, 15ms 경우가 제외되었는데, 이것은 1000회를 분주할 때 노즐 끝 부분에서 액적의 축적이 일어나기 때문이다. 이 때문에 측정에 오차가 심각하게 발생하여 제외하였으며 실제 임상의료기기에서 사용 시에 이러한 액적의 축적은 오염과 같은 문제를 발생시킬 수 있어 위와 같은 조건에서의 분주는 피해야 할 것이다.

고속 솔레노이드 밸브의 개방시간이 ms단위로 작아질 경우 기계적으로 열리고 닫히는 밸브의 특성상 실험적인 정보가 필수적이다. 따라서 짧은 개방시간에 따른 액적의 분주량을 조사하였다. 압력은 15kPa과 25kPa로 실험하였고 각 노즐별로의 액적의 분주량을 조사하였다. 자세한 실험조건은 Table 1에 나타내었다. 위의 최소 분주량 측정과 마찬가지로 무게측정 방법에서는 액적의 축적이 있는 경우는 데이터에서 제외하였다. Fig.6에서 알 수 있듯이 밸브의 개방시간이 증가할수록 분주량은 완벽하지는 않지만 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

V. 결론

본 연구에서 고속 솔레노이드 밸브 및 다양한 유체 요소들을 이용하여 비접촉식 분주시스템을 개발하고 이에 대한 공경연구를 수행하였다. 고속 솔레노이드 밸브의 개방시간을 조절함으로써 50 nL 수준으로 안정적인 최소분주량을 확보할 수 있었다. 더불어 다양한 제어변수(노즐개방시간, 압력, 노즐크기)에 대한 실험을 수행함으로써 필요한 분주량을 구현할 수 있는 기초데이터를 확보하였다. 개발된 고속솔레노이드 밸브 기반 분주시스템은 압축공기를 이용한 비접촉식 분주로 기존 임상의료기기에서 발생할 수 있는 오염문제와 세척문제를 획기적으로 없앨 수 있으며 또한 가격도 시린지 형태의 분주기계보다 저렴하다는 장점을 가지고 있다. 이러한 분주시스템을 임상 의료기기 뿐만 아니라 표면실장, 마이크로 패터닝 등

다양한 분야에서 사용이 가능하리라 사료된다.

Acknowledgement

이 성과는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2017R1C1B5017763 & 2018R1A6A1A03025526).

참고 문헌

- [1] Thomas C. Tisone, 1998, "Dispensing systems for miniaturized diagnostics," IVD Technology Magazine, IVDT Article Index
- [2] Gregory J. Wendel, 2006, "Liquid Handling With Adaptive Real-Time Validation," JALA, April 2006, pp.88-91.
- [3] Anthony V. Lemmo, Jeffrey T. Fisher, H. Mario Geysen and Donald J. Rose, 1997, "Characterization of an Inkjet Chemical Microdispenser for Combinatorial Library Synthesis," Anal. Chem., Vol.69, pp.543-551
- [4] <http://www.innovadyne.com/>
- [5] J. Steven Hicks, Brent W. Harker, Kenneth L. Beattie and Mitchel J. Doktycz, 2001, "Modification of an Automated Liquid-Handling System for Reagent-Jet, Nanoliter-Level Dispensing," BioTech., Vol.30, pp.878-885
- [6] A. Puntambekar and C. H. Ahn, 2003, "A NOVEL MICRODISPENSER ARRAY FOR ACCURATE OFF-CHIP DISPENSING FOR MICROARRAY APPLICATIONS," micro-TAS 2003, CA, USA, October 5-9, pp.975~978