

압전 젯팅 디스펜서의 작동 변수에 대한 실험적 분석

Experimental Analysis of Operating Parameters for Piezoelectric Jetting Dispenser

손 정 우* · 홍 승 민** · 김 기 우*** · 최 승 복†

Jung Woo Sohn, Seung-Min Hong, Gi-Woo Kim and Seung-Bok Choi

(Received August 31, 2015 ; Revised August 31, 2015 ; Accepted September 21, 2015)

Key Words : Piezo-stack Actuator(압전 스택 작동기), Jetting Dispenser(액체 토출 장치), Design of Experiment(실험계획법), Fractional Factorial Design(부분요인배치)

ABSTRACT

In this work, to identify effective parameter for performance of piezoelectric jetting dispenser, experimental investigation is carried out based on design of experiment. After preparing jetting dispenser using two stack-type piezoelectric actuators, basic working principle of the jetting dispenser is described. Eight operating conditions are chose as main factors and it is assumed that each factor has two levels. To reduce number of experiments for performance evaluation, the experimental sets are designed based on factional factorial design method. Experimental setup is established and the weight of single dot is measured by using precision scale. The main and interaction effects of factors are analyzed using commercial statistical program and optimal operating condition for small amount and small variation of weight of dispensed single dot are determined.

1. 서 론

디스펜싱 시스템은 화학제품, 접착제, 페인트 등 여러 가지 형태의 액체 또는 용액을 효과적으로 토출시키기 위하여 다양한 산업현장에서 활용되고 있는 장치이다. 특히 최근에는 반도체 패키징 공정과 LED 형광체 도포 공정 등에서 핵심 장비로 사용되고 있으며, 반도체 칩 크기의 소형화와 LED 공정의 고직접화 등에 따라 정밀한 작업을 수행할 수 있는 디스펜싱 시스템에 대한 관심도 증가하고 있다⁽¹⁻³⁾.

이러한 디스펜싱 시스템에서 디스펜서는 액체 토

출 용액을 미세하고 정확한 양을 반복적으로 토출하기 위해 가장 중요한 부분이다. 작동 방식에 따라 압축 공기를 이용한 단순한 방식, 모터 등을 이용한 양변위 방식, 압전작동기 등을 이용한 젯팅 방식으로 분류할 수 있다. 압축 공기를 이용한 방식은 압축 공기의 크기와 시간에 따라 토출되는 양이 결정되는 단순한 구조를 가지지만, 용액의 특성에 따라 토출 특성이 크게 바뀌는 단점이 있다. 양변위 방식은 피스톤의 이동량에 따라 토출량이 결정되는 형태로 토출량이 큰 경우에는 용액의 특성에 의한 영향이 크지 않으나 토출량이 작을 경우에는 용액의 특성에 영향을 받게 되어 미세 정량 토출에는 적합하

† Corresponding Author ; Member, Department of Mechanical Engineering, Inha University
E-mail : seungbok@inha.ac.kr

* Member, Department of Mechanical Design Engineering, Kumoh National Institute of Technology

** R&D Center, PROTEC Inc.

*** Member, Department of Mechanical Engineering, Inha University

‡ Recommended by Editor Heung Soo Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

지 않다. 젯팅 방식은 지속적으로 미세한 양을 토출하는 데 적합한 방식으로 최근 많이 사용되고 있으나 용액의 점성이 토출 성능에 영향을 미치게 되어 고점도 용액의 토출이 어려운 단점이 있다.

Chen과 Kai는 모터를 이용한 양변위 디스펜싱 과정에 대한 모델을 제안하고, 제안된 모델을 이용하여 유체의 부피, 니들의 온도 등 여러 인자들이 디스펜싱 성능에 미치는 영향을 파악하였다⁽⁴⁾. Nguyen 등은 양변위 디스펜서와 압전작동기 기반의 젯팅 디스펜서의 장점을 결합한 하이브리드 형태를 제안하였다⁽⁵⁾. 내부 유체에 대한 모델링을 수행하였고, 변위확대기구의 최적 설계를 수행하였다. Choi 등은 stack 형태의 압전작동기를 기반으로 한 젯팅 디스펜서를 제안하였다⁽⁶⁾. 집중매개변수를 이용하여 유압식 변위확대기구와 내부 유체의 통합 모델을 제안하였고, 토출 성능을 시뮬레이션을 통하여 평가하였다. Yoon 등은 저점도 용액의 직접 토출을 위한 압전 작동기 기반의 젯팅 디스펜서를 제안하였다⁽⁷⁾. 별도의 변위 확대 기구를 적용하지 않고, 저점도 용액을 직접 토출하는 방식을 제안하였으며, 집중매개변수 기법을 적용하여 작동기와 유체의 모델을 구성하였다. Luo와 Deng은 젯팅 디스펜서 응용을 위한 두 개의 압전 스택 작동기 모델을 제안하고 성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 평가하였다⁽⁸⁾. Jeon 등은 두 개의 stack 형태의 압전작동기를 이용한 새로운 형태의 젯팅 디스펜서를 제안하고 실험을 통하여 토출 성능을 평가하였다⁽⁹⁾. 두 개의 압전작동기와 변위확대기구를 포함하는 구동부와 니들을 포함하는 전체 시스템을 설계하고 유한요소 해석을 통해 구조 해석을 수행하였다. 실제 제작된 디스펜서를 이용하여 응답 특성과 토출 특성을 평가하였다. 기존의 연구에서는 압전 젯팅 디스펜서를 제안하고 입력 전압에 따른 토출 성능을 예측하거나 평가하였다. 그러나 실제 젯팅 디스펜서의 토출 성능에는 여러 가지 작동 환경과 다양한 인자들이 영향을 미칠 수 있으며, 이러한 인자들을 모두 고려한 토출 성능 평가는 이루어지지 않고 있다.

이 연구에서는 압전작동기를 적용한 젯팅 디스펜서의 성능에 영향을 주는 작동 인자들에 대한 실험적 분석을 수행하였다. 압전작동기를 이용한 젯팅 디스펜서의 작동 원리를 소개하고, 성능 평가를 위한 실험 장치를 구성하였다. 디스펜서의 성능에 영

향을 주는 8개의 인자를 선정하고, 각 인자는 2개의 수준을 가진다고 가정하였다. 전체 실험의 수가 256개로 모든 실험을 수행하기에는 많은 시간과 비용이 필요하므로, 부분요인배치 실험계획법을 사용하여 16개의 실험을 설계하고, 실행 순서에 의한 영향을 배제하기 위하여 1회 반복을 수행하여 총 32회의 실험을 수행하였다. 각 실험에서는 디스펜서에서 토출된 용액의 무게를 측정하여 평균값과 표준편차를 계산하였다. 실험 결과는 통계 소프트웨어를 이용하여 분석되었으며, 토출된 용액의 평균값과 표준편차를 최소화 할 수 있는 최적의 작동 조건을 선정하였다.

2. 압전 젯팅 디스펜서

이 연구에서 고려된 압전작동기를 이용한 젯팅 디스펜서의 개략적인 구조를 Fig. 1에 나타내었다⁽⁹⁾. 두 개의 스택 타입 압전작동기가 나란히 배치되어 있고, 압전작동기의 상부와 하부는 캡(cap)으로 보호하였다. 상부캡 위에는 볼트를 이용하여 압전작동기의 초기 위치를 조절할 수 있도록 하였다. 압전작동기의 변위 확대를 위하여 힌지-레버 형태의 변위확대기구가 적용되었으며, 변위확대기구의 다른 한 쪽은 디스펜싱 니들과 연결되어 노즐을 통하여 용액을 토출할 수 있도록 하였다. 그리고, 힌지의 초기 위치 복원을 위하여 스프링이 적용되었다. 제안된 디스펜서는

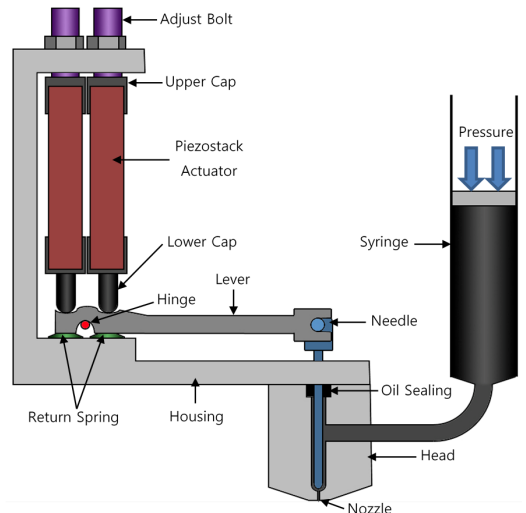


Fig. 1 Structural configuration of piezoelectric jetting dispenser⁽⁹⁾

다음의 네 과정을 반복적으로 수행하여 토출을 하게 된다. 왼쪽과 오른쪽 압전작동기가 각각 인장과 압축을 하게 되면, 레버는 반시계 방향으로 회전하게 되고 니들이 상승하여 헤드 내부 빈 공간으로 용액이 충전된다(상승 과정). 용액이 충분히 충전될 수 있도록 압전작동기의 입력 전압을 일정 시간 동안 유지하게 된다(열림 과정). 반대로 왼쪽과 오른쪽 압전작동기가 각각 압축과 인장을 하게 되며, 레버는 시계 방향으로 회전하게 되고, 니들이 하강하면서 노즐을 통하여 용액을 토출하게 된다(토출 과정). 토출 후에도 일정 시간 동안 니들은 그 위치를 유지하게 된다(단합 과정).

3. 실험 설계

설계된 젯팅 디스펜서의 특성을 확인하기 위하여 Fig. 2와 같이 정밀 저울을 통하여 토출된 양을 측정할 수 있는 실험 장치를 구성하였다. 시린지(syringe)의 용액에는 일정한 공압을 인가하여 용액이 노즐로 이동할 수 있도록 하였다. 제어기에서 결정된 제어 입력은 고전압 증폭장치를 통해 압전 스택 작동기로 인가되게 되고, 토출된 용액은 0.01 mg의 정밀도를 갖는 전자 저울을 사용하여 무게를 측정할 수 있도록 하였다. 이 실험에 사용된 용액은 LED(light emitting diode) 공정에서 사용되는 다우코닝사의 OE-6630 모델을 사용하였으며, 실제 산업 현장과 동일한 환경을 구성하기 위하여 노란색 형광체(YAG) 20%와 R202 필러(filler) 5%를 첨가하였다. 용액의 물성치는 Table 1에 나타내었다.

젯팅 디스펜서의 토출 성능을 평가하기 위해서는 토출된 용액의 양에 대한 정확성과 정밀도를 평가해야 하는데, 토출 성능에 영향을 미치는 인자는 매우 다양하다. 이 연구에서는 작동 주파수, 작동 스트로크, 압전작동기의 초기 눌림 예압량, 상승 시간, 열림 시간, 하강 시간, 노즐의 지름과 노즐의 온도 등 8가지의 인자를 설정하였고, 시린지의 공기압력은 241 kPa로 고정하였다. 전체 8개의 인자들은 각각 2개의 수준을 갖는 것으로 가정하였으며, 이를 Table 2에 자세히 나타내었다. 이 논문에서는 편의상 낮은 수준을 “-1”, 높은 수준을 “+1”로 표기하기로 한다. 스트로크는 압전작동기에 인가되는 입력 전압에 의해 결정되는데, 인가할 수 있는 최대 전압(150 V)의

65%와 85%가 인가되었을 때의 스트로크를 두 가지 수준으로 고려하였다. 또한 압전작동기의 초기 눌림 예압량의 경우, 예압이 전혀 없을 때를 0%라고 했을 때, 20%와 80% 두 가지 수준을 고려하였다. 8개의 인자를 고려하였으므로, 토출 성능에 대한 각 인자의 영향을 관찰하기 위해서는 $256(=2^8)$ 회의 실험을 수행해야 한다. 그러나 실험의 수가 너무 많으므로 이 연구에서는 1/16 부분요인 배치법을 이용하여 16회의 실험을 설계하였다⁽¹⁰⁾. 또한 실험 순서에 의한 효과를 무시하기 위하여 전체 실험을 1회 반복하도록 하여 총 32회의 실험을 수행하였다. 설계된 실험의 각 조건은 Table 3에 나타내었다.

4. 결과 및 토의

제안된 압전 젯팅 디스펜서를 이용한 용액의 토출 실험을 수행하였다. 설계된 각 실험은 500회 반복 실행되었으며, 각 실행에서 토출된 용액의 무게를 측정하여 각 실험에 대한 평균과 표준편차를 계산하였고, 그 결과를 Table 4에 정리하였다. Table 4에

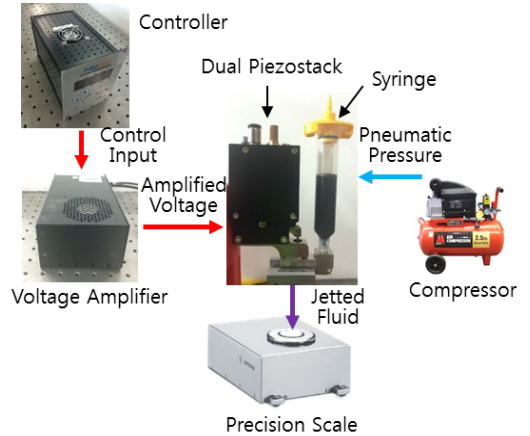


Fig. 2 Experimental setup

Table 1 Dispensing fluid properties

OE-6630	
Viscosity	2300 cp
Surface tension	22 dyne/cm
Phosphor : YAG, 20 %	
Filler : R202, 5 %	

Table 2 Eight factors and two levels of each factor

Notation	Factor	Unit	Level	
			-1	+1
A	Freq.	Hz	50	100
B	Stroke	%	65	85
C	Spring pre-load	%	20	80
D	Rising time	ms	0.5	1.5
E	Open time	ms	0.5	1.5
F	Falling time	ms	0.05	0.1
G	Nozzle dia.	mm	0.2	0.3
H	Nozzle temp.	℃	35	45

Table 3 Designed experiment sets

Stand. order	A	B	C	D	E	F	G	H
1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1
2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
3	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1
4	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
5	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1
6	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1
7	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1
8	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1
9	-1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	-1
10	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	-1
11	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	-1
12	-1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	-1
13	+1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	-1
14	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1
15	+1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	-1
16	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1
17	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
18	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1
19	-1	1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
20	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1
21	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1
22	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1
23	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1
24	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1
25	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1
26	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1
27	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1
28	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1
29	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
30	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1
31	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1
32	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1

나타난 바와 같이 실험 1번과 3번 또는 2번과 4번처럼 동일한 조건에 대한 실험의 평균값의 차이는 1번과 2번 실험의 차이보다 상대적으로 매우 작다.

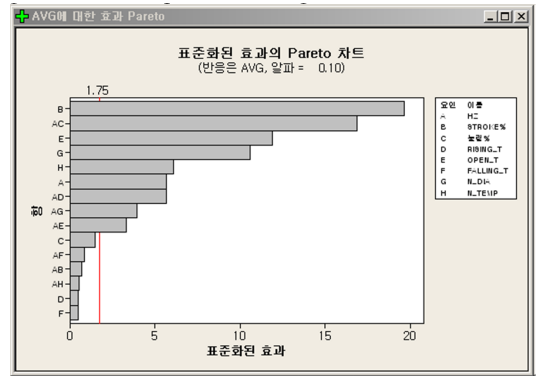
이로부터 실험 순서가 토출 성능의 변화에 미치는 영향은 매우 작은 것으로 판단할 수 있다. Table 4의 결과는 상용 통계 해석 프로그램인 Minitab을 사용하여 결과를 분석하였으며 유의 수준은 0.1로 고려하였다⁽¹⁰⁾. Fig. 3에는 토출된 용액 무게의 평균에 대한 주효과도가 나타나 있다. 주효과도에서는 인자의 수준에 따라 기울기가 없는 경우는 결과에 영향을 미치지 않는 것이고, 기울기가 있는 경우에는 인자의 수준에 따라 결과가 영향을 받는 것을 의미한다. 그림에 나타난 바와 같이 스트로크, 열림 시간, 노즐 지름 등이 작을수록 평균이 감소하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4(a)와 (b)에는 각 인자의 주효과와 교호효과가 유의한 지 확인할 수 있는 파레토 차트(Pareto chart)와 1/2 정규확률도를 나타내었다. Fig. 4(a)에 나타난 파레토 차트에서는 붉은색 세로 선의 우측까지 확장된 인자는 유의한 것으로 판단할 수 있으므로, 스트로크(B), 열림 시간(E), 노즐 지름(G), 노즐 온도(H), 주파수(A)의 주효과와 주파수-눌림 예압량(AC), 주파수-상승 시간(AD), 주파수-노즐 지름(AG), 주파수-열림 시간(AE)의 교호효과는 유의하다. 이러한 결과는 Fig. 4(b)의 1/2 정규 확률도에 동일하게 나타나는데, 붉은 점으로 표시된 인자들은 유의함을 나타낸다. 유의미한 교호효과도는 Fig. 5에 나타내었다. 교호효과도에서는 두 개의 선이 교차하는 것은 두 인자의 교호효과가 있는 것이고, 두 선이 평행하면 교호효과가 없는 것을 의미한다. 주파수와 눌림 예압량의 교호효과를 보면, 주파수가 50 Hz인 경우에는 눌림 예압량이 20 %일 때, 주파수가 100 Hz인 경우에는 눌림 예압량이 80 %일 때 표준 편차가 작아지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6에는 토출된 용액 무게의 표준 편차에 대한 주효과도를 나타내었다. 스프링 눌림 예압량이 작은 경우, 노즐 지름이 작은 경우에 표준 편차가 감소하는 것으로 보인다. 토출된 용액 무게의 표준 편차에 대한 파레토 차트와 1/2 정규확률도를 Fig. 7(a)와 (b)에 각각 나타내었다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 주효과에서는 노즐 지

름(G) 만이 유의미하고, 교호효과에서는 주파수-눌림 예압량(AC) 만이 유의미한 것을 확인할 수 있다. 토출된 용액 무게의 표준 편차에 대한 교호효과는 Fig. 8에 나타내었다. 토출된 용액 무게의 평균에 대한 교호효과와 동일하게, 주파수가 50Hz인 경우에는 눌림 예압량이 20%일 때, 주파수가 100 Hz인 경우에는 눌림 예압량이 80%일 때 표준 편차가 작아지는 것을 확인할 수 있다.

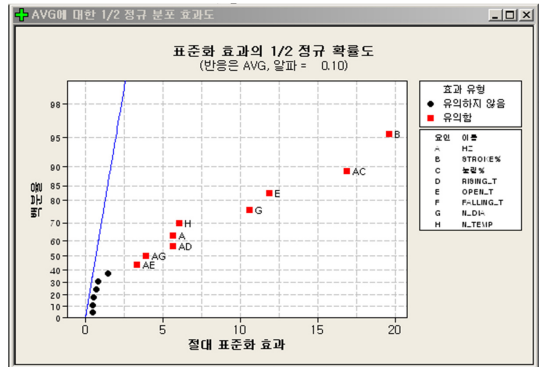
Table 4 Average and standard deviation of results

Stand. order	Ave.	Stand. dev.	Stand. order	Ave.	Stand. dev.
1	0.103	0.001	17	0.111	0.002
2	0.089	0.001	18	0.103	0.001
3	0.101	0.001	19	0.099	0.001
4	0.087	0.000	20	0.102	0.000
5	0.087	0.000	21	0.094	0.001
6	0.100	0.000	22	0.105	0.000
7	0.100	0.000	23	0.093	0.001
8	0.082	0.001	24	0.111	0.000
9	0.138	0.000	25	0.096	0.001
10	0.101	0.002	26	0.174	0.001
11	0.097	0.002	27	0.170	0.001
12	0.134	0.001	28	0.082	0.003
13	0.093	0.003	29	0.166	0.002
14	0.122	0.001	30	0.067	0.002
15	0.086	0.002	31	0.060	0.001
16	0.111	0.002	32	0.158	0.001

이러한 결과를 바탕으로 젯팅 디스펜서의 토출된 용액 무게의 평균과 편차가 가장 작아지도록 하는 작동 조건의 최적화를 수행하였다. 각 2개씩의 수준을 갖는 8개의 작동 조건에 대한 최적화 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 주파수는 100 Hz, 스트로크는



(a) Pareto chart



(b) Normal probability

Fig. 4 Pareto chart and normal probability plot for average

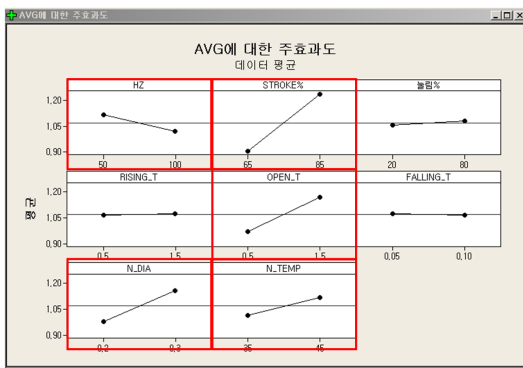


Fig. 3 Main effect plots for average

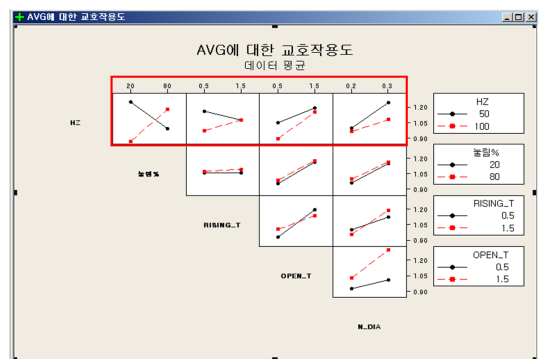


Fig. 5 Interaction effect plots for average

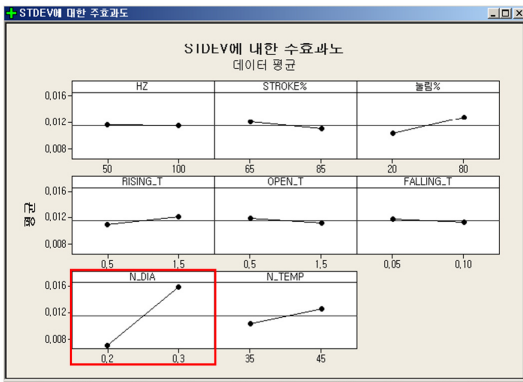


Fig. 6 Main effect plots for standard deviation

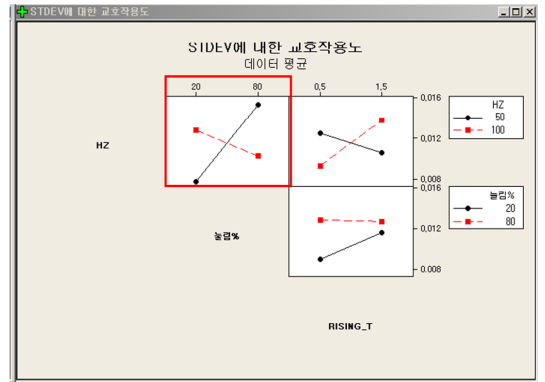
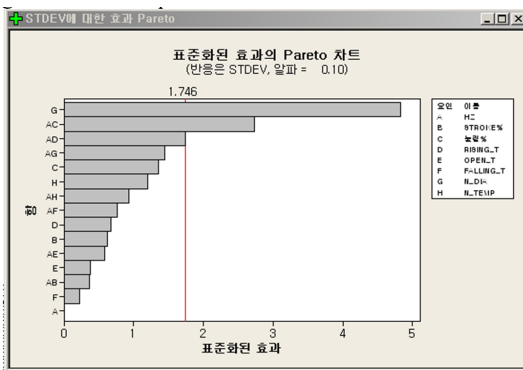
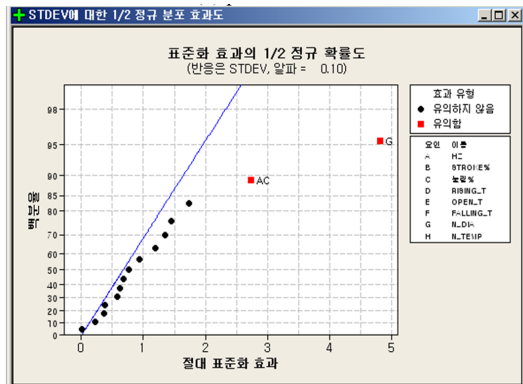


Fig. 8 Interaction effect plots for standard deviation



(a) Pareto chart



(b) Normal probability

Fig. 7 Pareto chart and normal probability plot for standard deviation

85 %, 스프링의 놀림 예압은 80 %, 상승 시간은 0.5 ms, 열림 시간은 0.5 ms, 하강 시간은 0.5 ms, 노즐의 지름은 0.2 mm, 노즐의 온도는 35 °C에서 가장 작은 토출량과 표준 편차를 갖는 것을 확인하였다.

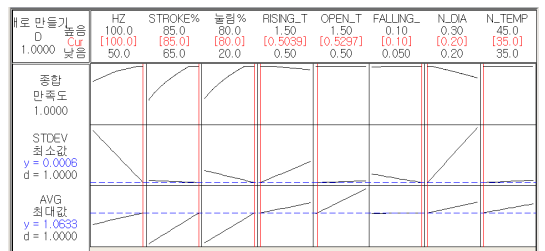


Fig. 9 Optimization of jetting conditions

5. 결론

이 연구에서는 두 개의 압전 스택이 적용된 젯팅 디스펜서의 토출 성능에 영향을 주는 인자를 파악하기 위한 실험을 수행하고 그 결과를 통계적 방법으로 해석하였다. 젯팅 디스펜서의 작동 원리를 설명하고, 제작된 디스펜서와 정밀한 저울 등을 이용하여 실험 장치를 구성하였다. 디스펜서의 토출 성능에 영향을 주는 8개의 인자를 선정하고, 각 인자는 2개의 수준을 가지는 것으로 가정하였다. 각 인자의 영향을 파악하기 위하여 256회의 실험이 필요하나, 실험계획법의 부분요인배치 기법을 이용하여 16회의 실험을 설계하였고, 실행 순서에 의한 영향을 배제하기 위하여 전체 실험의 1회 반복을 수행하여 총 32회의 실험을 진행하였다. 각 실험에서 측정된 토출 용액의 무게에 대한 평균과 표준편차를 계산하였고, 주효과와 교호효과 분석을 통해 각 인자의 영향력을 파악하였다. 이를 바탕으로 토출 용액의 평균값과 표준편차를 최소화할 수 있는 최적의 작동 조건을 선정하였다.

후 기

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2014R1A1A2057625).

References

(1) Dixon, D., Kazalski, J., Murch, F. and Marongelli, S., 1997, Practical Issues Concerning Dispensing Pump Technologies, Circuits Assembly, Vol. 8, No. 8, pp. 36~40.

(2) Ness, C. Q. and Lewis, A. R., 1998, Pathways to SMT Part5-Adhesive/Epoxyes & Dispensing, Surface Mount Technology, Vol. 12, No. 5, pp. 114~122.

(3) Wedekin, S., 2001, Micro Dispensing Comes of Age, Surface Mount Technology, Vol. 15, No. 4, pp. 62~71.

(4) Chen, X. B. and Kai, J., 2004, Modeling of Positive-displacement Fluid Dispensing Processes, IEEE Transaction on Electronics Packaging Manufacturing, Vol. 27, No. 3, pp. 157~163.

(5) Nguyen, Q. H., Choi, M. K., Yoon, B. Y. and Choi, S. B., 2006, Design of a New Dispensing System Featuring Piezoelectric Actuator, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 7, pp. 739~745.

(6) Choi, M. K., Nguyen, Q. H., Yoon, B. Y. and Choi, S. B., 2006, Design and Control of Jetting Dispenser Driven by Piezoelectric Actuator, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 11, pp. 1165~1171.

(7) Yoon, B. Y., Hung, Q. H., Sohn, J. W. and Choi, S. B., 2008, Performance Characteristics of High Speed Jetting Dispenser Using Piezoactuator, Transactions of the Korean Society for Noise and

Vibration Engineering, Vol. 18, No. 4, pp. 432~438.

(8) Luo, W. and Deng, G., 2013, Simulation Analysis of Jetting Dispenser based on Two Piezoelectric Stacks, Proceedings of the 14th International Conference on Electronic Packaging Technology, pp. 738~741.

(9) Jeon, J., Hong, S. M., Choi, M. K. and Choi, S. B., 2014, Design and Performance Evaluation of a New Jetting Dispenser System Using Two Piezostack Actuators, Smart Materials and Structures, Vol. 24, No. 1, pp. 015020-1~11.

(10) Design of Experiment based on Minitab Examples, Lee, Sang-Bok, ERETEC, Inc. 2014.



Jung Woo Sohn received his Ph.D. degree in the Department of Mechanical Engineering from Inha University in 2008. He is now working as an assistant professor in the Department of Mechanical Design Engineering of

Kumoh National Institute of Technology. He has interest on the design and control of smart structures and systems.



Seung-Bok Choi received the B.S. degree in Mechanical Engineering from Inha University in 1979, MS degree and Ph.D. degrees from Michigan State University in 1986 and 1990, respectively. He is currently Dean of the Graduate

School and fellow professor in Inha University. He is a fellow of NAEK(National Academy Engineering of Korea), KAST(The Korean Academy of Science and Technology). His research interests are robust controller design and control of various systems using smart actuators.