

산업용 잉크젯 플로터의 압전세라믹 헤드에 의한 드롭제어

*최근수¹, *윤신용, **백수현, **김용
 *(주)디지아이 기술연구소, **동국대학교 전기공학과

Drop Control by Piezoelectric Ceramic Head of Industrial Inkjet Plotter

*Choi, Geun-Soo, *Yoon Shin-Yong, **Baek Soo-Hyun, **Kim Yong
 *(Corp.) DGI, Technical Research, **Dongguk University, Electrical Department

Abstract - This paper analyzes the principle and feature of the piezoelectric ceramic print head for the image printing of industrial inkjet plotter, and apply the Drop-on-Demand method that can adjust an ink drop size in accordance with the certain time adjustment. In order to do this study, drive frequency is selected at maximum 8.3[kHz] which can be operated within resonance frequency range of the piezoelectric ceramic. Drop controlling was realized according to pulse waveform the drive voltage, and grey-scale and satellite diminution method were applied for printing of high resolution image. A feasibility study of the result will be demonstrated by constructing the experiment equipment.

1. 서 론

급속한 정보화 산업의 발달에 따라 다양한 이미지의 국내/외용 광고물의 요구가 증대되고 있다. 특히 잉크젯 제어기술을 이용한 시장이 더욱 확산되고 있다. Desk top printer 만이 아니라 대형 Color Graphics, Digital on Demand Printer, Package, Textile, Display, 반도체, Bio Chip 등으로 용도가 넓어지고 있다. Inkjet 기술의 역사는 1800년 후반에 영국의 Railcigh가 비점성체의 입자화 과정을 수리해석하고 연속식(Continuous) 잉크기술의 기초가 되는 액적이론을 발표한 것으로 거슬러 올라간다. 그러나 현재 사용되는 잉크젯기술이 본격적으로 개발된 시기는 1960년대에 Tel type사의 Winston의 전계 제어방식과 Stanford Instrument 사의 하전제어방식에 기인되며 1970년대에는 Kyser, Zaltan 등에 의한 On-demand 방식이 개발되었다. 잉크젯 기술은 그 분사 형태에 따라 연속식 방식과 임펄스(Drop on demand) 방식으로 분류할 수 있다. Drop on demand 방식은 잉크분사 구동원이 열에 의한 히터의 가열인 경우로 열(Thermal) 방식과 압전(Piezoelectric)방식으로 분류할 수 있다. 본 연구에서는 필요한 시간에만 압전세라믹 소자에 의해 압력으로 잉크를 밀어내는 Drop on demand 방식을 적용하였다.[1]-[6]

압전 세라믹은 형상이나 치수에 대응되는 고유진동을 가지고 있고 인가전압의 주파수를 이 고유진동과 일치시키면 공진을 만들게 된다. 이 공진주파수에서 압전 세라믹을 진동시키면 큰 진동 진폭이 얻어지며 최대한의 전류가 흐르게 된다. 본 연구에서는 이러한 압전 헤드의 공진 주파수와 구동주파수를 일치시켜 고효율의 최적구동이 될 수 있는 범위에서 드롭제어가 가능하도록 구성하였다. 고선명도의 이미지를 출력력을 위해 잉크조절이 가능한 그레이스케일(Grey-scale) 방법과 잔점 저감을 위한 잔상(Satellite) 저감법을 제시하였다. 이에 대한 타당성을 입증하기 위하여 본 연구에서는 실험 장치를 구성하여 원하는 고선명 이미지 결과를 얻을 수 있었다.

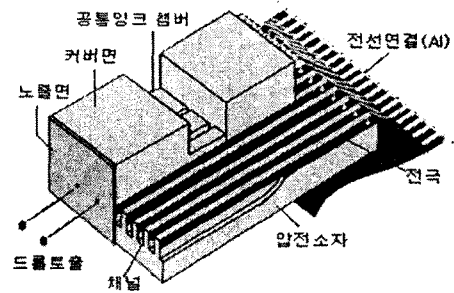
2. 본 론

2.1 프린터헤드의 동작 원리

잉크젯 기술은 핵심부품인 잉크젯 프린트헤드, 잉크 및 System/Firmware의 3가지 요소기술과 이동 기술을 통합할 수 있는 Integration 기술이 갖추어져야 한다. 그림 1은 Shear 모드 형 압전 잉크젯 헤드의 전체 구조를 나타낸 것이다. 여기서 잉크젯 프린터 헤드는 3부분으로 구성되며 커버와 채널요소들은 모두 압전 세라믹으로 만들어지고 노즐 플레이트는 폴리이미드(Polyimide)필름으로 제작되었다. 기본구조는 채널요소로 구성되며, 여기에 병렬로 홈에 금을 내었는데 이것은 잉크 통로(ink channel)와 그들 사이를 나누어 주는 벽들(shared walls)로 구성된다. 알루미늄 전극은 옆벽들의 위에서 절반부분에 부착이 되어있고 커버는 그 벽들의 상단에 얇고 단단한 아교 층에 의해서 부착되어진다. 잉크는 공동 잉크 챔버에 입력된다. 잉크는 대기압에 의해서 챔버 분기관으로 들어가게 된다. 또한 커버에 아랫부분을 잘라낸 부분은 채널의 동작 길이가 된다. 이러한 조립품을 액추에이터라고 한다.

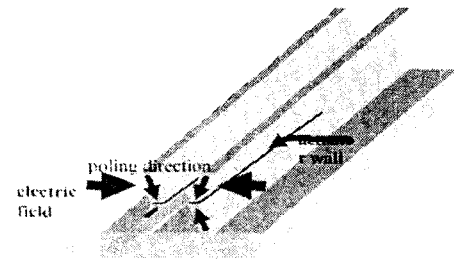
전극 후미는 보드 선과 연결되어 있으며 구동 신호들은 채널에 적용되어진다. 그 결과 전기장이 전극의 방향에 수직으로 작용되어 벽의 아래 부분의 절반은 전단 모드로 변형이 이루어져 벽이 움직이

게 된다. 벽면의 하부의 절반은 상부 절반의 움직임에 따라 강제적으로 움직이게 되므로 벽면은 갈매기 형상(A.V)으로 변형이 일어나게 되며 이것은 그림 2와 같다. 노즐면은 액추에이터의 앞단에 부착되어있고 한 채널당 하나의 노즐이 달려있다.



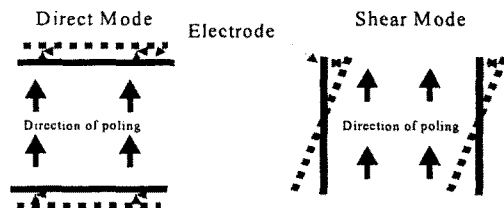
<그림 1> 잉크젯 압전 세라믹 헤드의 구조

그림 2는 Shear 모드형 잉크젯 헤드의 한 노즐에 의해 잉크가 분사되는 채널과 전극구조를 나타낸 것이다. 여기서 이미지 데이터의 명령에 따라 바이너리(binary) 프린팅으로 동작 길이와 노즐의 직경은 상대적으로 커지게 되고 그러므로 커다란 방울이 분사되어진다.



<그림 2> 잉크젯 압전 헤드의 Shear 모드

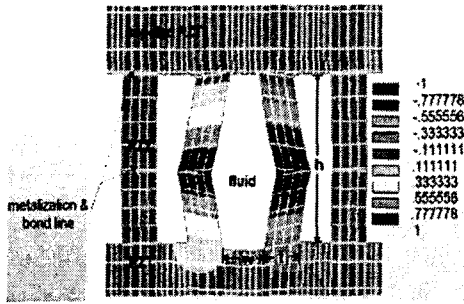
그림 3은 공진주파수에 대한 진동모드를 나타낸 것으로, 모드는 크게 전계방향과 분극방향이 같은 종진동모드(Direct mode)와 전계방향과 분극방향이 직각인 전단모드(Shear mode)로 분류할 수 있다. 본 연구에서는 동일한 전계에 대해서 더 큰 변형을 발생하는 shear 진동모드를 적용하여 구동효율을 높였다.



<그림 3> Direct mode와 Shear mode

그림 4는 전계해석용 유한요소법 틀에 의해 해석된 잉크젯 압전소자 헤드 요소분할 모형과 변형 응력을 나타낸 것이다. 그림 4에서 적색(+)과 청색(-)은 전극의 구동전압에 따라 압전소자의 변형 응력이 가장 많이 발생함을 나타낸 것이다.

2.2 특성해석 및 관련 수식



〈그림 4〉 유한요소법에 의한 해석

그림 2의 Shear 모드에서 압전소자의 미소 이동변위 l_v 는 식(1)과 같다.

$$l_v = \frac{d_{15}hv}{4t} \quad (1)$$

여기서 d_{15} : 압전상수, v : 공급전압, h : 채널 깊이, t : 채널두께

전압인가에 의한 채널내 발생압력 p 는 식(2)으로 계산할 수 있다.

$$P = 2 \times (\Delta l/w) \times b \times \frac{v}{1 + \delta \times k_{cr}} \quad (2)$$

여기서 δ : 채널의 구동 패턴에 의해 정해지는 정수, Δl : 압전소자의 평균변위, v : 구동전압, w : 채널 폭, b : 잉크의 체적 탄성률. 압전소자가 채널내 압력상승에 의해 뒤밀려지면 발생압력은 감소하며 이때 탄성비의 값에 의해 채널 내를 전파하는 압력파의 속도도 변화한다. 이것은 채널 내압에 의한 잉크의 체적변화가 압전소자의 변형에 의해 실효적으로 크게 된다. 즉 잉크의 체적 탄성률이 외관상 작게 되기 때문이다. 이 때문에 형상 변경이 공진주파수에 영향을 주기 때문에 주의가 필요하다. 압력파의 전파속도는 식(3)과 같다.

$$V_0 = \frac{(b/\rho)^{1/2}}{(1 + \delta + k_{cr})^{1/2}} \quad (3)$$

여기서 ρ : 잉크 밀도.

압력파의 공진주파수는 식(4)와 같다.

$$f_0 = \frac{V_0(1 + \alpha)}{4L} \quad (4)$$

여기서 α : 형상보정계수, L : 채널길이($w+t$).

발생압력은 압전소자의 변위에 비례하기 때문에 인가 전압당 변위를 크게 할 필요가 있다.

변위와 잉크에 주어지는 탄성에너지의 관계는 식(5)로 주어진다.

$$W_E = \frac{1}{2} \times b \times (l/w)^2 L h w \quad (5)$$

여기서 W_E : 잉크에 주어지는 탄성에너지

채널 내 발생 압력 P 와 에너지 W_E 의 관계는 식(6)과 같이 나타내어진다.

$$W_E = \frac{1}{2} P^2 L h (w/b) E \quad (6)$$

2.2.1 등가 커패시턴스

압전소자는 전기적으로 커패시턴스의 성능을 지니고 있으며, 이 커패시턴스 값은 드라이브 전력과 피크전류 사양 결정시 중요하다. 총 커패시턴스는 각 압전소자 채널 (최소 116pF, 최대 138pF)의 등가 커패시턴스 로드와 회로당 채널의 수 곱으로 결정된다.

2.2.2 구동 전류

헤드 압전소자의 구동회로를 위한 총 등가 커패시턴스 부하에 대한 순시전류는 식(7)과 같다.

$$I = C_{TOTAL} dV / dt \quad (7)$$

2.2.3 구동 전력

헤드의 구동회로를 위한 총 전력은 다음과 같다.

$$P = C_{TOTAL} f V^2 \quad (8)$$

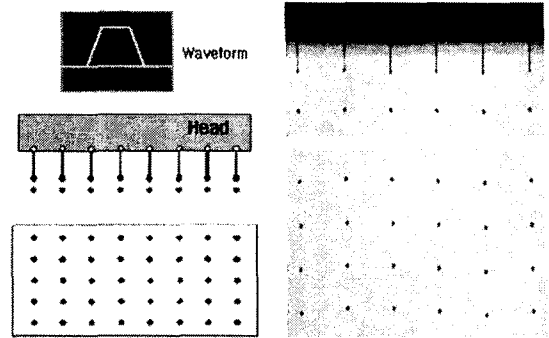
여기서 C_{TOTAL} : 총 커패시턴스, f : 구동주파수, V : 구동펄스전압. 이 전력 중 반은 압전소자를 충전하는데 쓰고, 나머지 반은 방전하는 동안 사용된다.

2.3 잉크젯 헤드에 의한 잉크 드롭제어

미소 Ink drop 형성 기술에 의해 고 선명도를 실현하기 위하여, 잉크 드롭의 체적을 미소화 시켜 기록 원단(media)상에서 화소 크기를 작게 할 필요가 있다. 잉크드롭의 크기를 최소화하기 위한 기술적 접근은 다음과 같다.

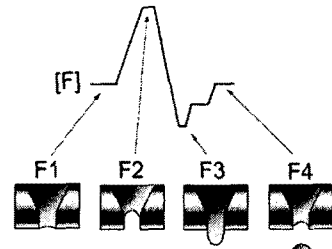
↑ 노즐(Nozzle) 개구의 단면적을 줄인다. (약 #20μ) Ⓢ Meniscus(요면凹)를 Pull-Push 제어한다. Ⓢ 잉크드롭의 분사과정을 단축한다. (고응답) Ⓢ 구동전압과 펄스폭을 조정한다.

그림 5는 잉크젯 헤드의 인가전압 패턴에 따른 잉크드롭을 나타낸 것이다. 그림 5(a)는 분사구조이며 그림 5(b)는 측정을 나타낸 것이다.



〈그림 5〉 잉크젯 헤드의 분사 구조도

헤드의 고성능화를 위해서는, 구조의 최적화와 함께 meniscus를 정밀하고 정확히 제어하는 것이 매우 중요하다. 본 논문에서는 meniscus의 형태, 진동을 최적으로 제어하는 meniscus 제어를 사용하여 다양한 체적, 속도 및 형태의 잉크드롭을 구현한다.



〈그림 6〉 잉크젯의 분사원리

그림 6은 meniscus 제어 중 잉크젯 헤드의 노즐에서 단위 시간당 가장 많은 Ink drop을 분사하는 PP2P(Pull Push 2Pull)에 대한 구동 신호를 나타낸 것이다. PP2P는 Ink drop 분사전, 분사시, 분사후의 모든 과정에서 meniscus를 고정도로 제어하는 기법이다.

그림 6의 F1에서는 중간 전위가 인가되어진 상태에서 靜定하고 있다. 그 곳부터 채널에 충전하는 것으로, 급격히 meniscus를 노즐 내(F2)로 빨아 들인다. 다시 meniscus가 노즐을 채우는 방향으로 진동하는 시간에 맞춰 채널을 dynamic하게 신장시키는 것으로, 채널의 움직임에 추종하여 압력 실이 수축하고, 그 결과 meniscus가 분사하여 (F3) 잉크드롭을 시작한다. 특히, Meniscus와 채널의 잔류 진동을 制振시키는 시간에서 중간 전위까지 재충전(F4) 한다.

PP2P를 사용하여 meniscus 진동의 勵起와 制振을 반복함으로써 헤드에서는 최대 구동주파수 8.3kHz의 주기로 잉크드롭의 분사 ON/OFF를 제어할 수가 있다.

2.3.1 온도 보상

헤드의 동작온도는 점도를 변화시키며 점도의 변화는 분사량과 압전 헤드의 성능에 영향을 미친다. 이러한 변화를 보상하기 위해 압전 헤드의 고 전압 공급은 반드시 가변되어야 한다.

- 저 온도는 고 점도를 주고 그 결과 고 전압을 필요로 한다.

- 고 온도는 저 점도를 주고 그 결과 저 전압을 필요로 한다.

여기서 조절방법은 헤드에 가해진 실제전압을 조정하는 것이다.

그림 7과 같이 압전 헤드의 온도는 온도센서에 의해 측정하여 헤드에 가해진 전압을 가변 하였을 때 잉크온도, 점도특성은 보상되어진다.

온도 보상은 식(9)과 같다.

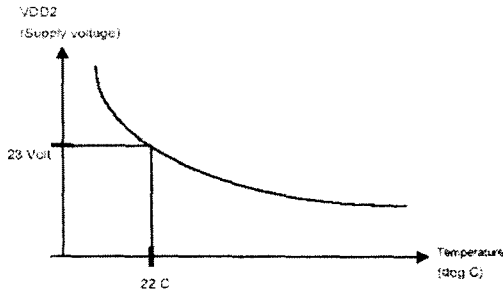
$$v_{trim} = k_{44} + k_{41} e^{k_{42} \left(\frac{1}{T+273} \right) - \left[\frac{1}{k_{43} + 273} \right]} \quad (9)$$

여기서 v_{trim} : 헤드 구동전압, T : 서미스터의 측정 온도.

k_{41} 상수, k_{42} 상수, k_{43} 상수, k_{44} 상수: 온도상수

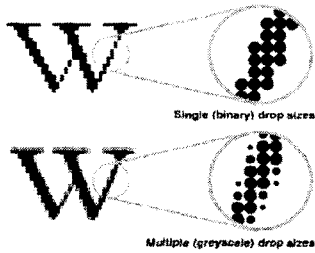
2.3.2 그레이스케일

잉크방울 크기는 보통 Binary 드롭크기로 표현되지만 잉크드롭의 크기를 조절할 수 있는 그레이스케일(grey-scale)로 적용하면 고 선명도를 실현할 수 있다. 이 기법은 채널로부터 많은 수량의 아주 작은 잉크드롭이 신속하게 연속적으로 분사된다. 연속적으로 작은 잉크방울들이 분사되어지는 것은 매우 급격히 일어나므로 미세한 방울들은 큰 방울을 만들기 위해 빠르게 분사되어 합쳐진다. 이 방울들의 크기는 픽셀(Pixel) 대 픽셀 기초에서 조절되어질 수 있다. 본 논문에서는 해상도는 360dpi(drop per inch)이며 그레이스케일은 7 단계가 적용되었다.



<그림 7> 공급전압(V_{DD2})과 온도보상 곡선

그림 8은 " W " 문자를 Binary 기법과 Grey-scale 기법의 차이로 나타낸 것이며, Grey-scale 기법시 큰 드롭 사이에 작은 드롭이 삽입됨으로써 더욱 부드러운 고 선명도를 나타낼 수 있다.



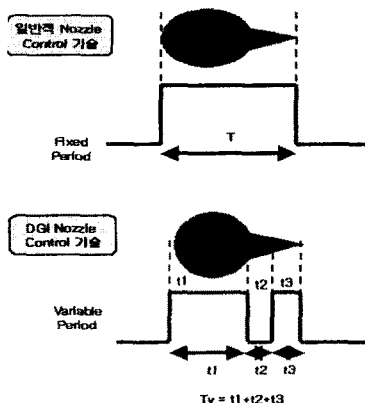
<그림 8> Binary와 Grey-scale 기법의 비교

3. 시뮬레이션 및 실험 결과

표 1은 본 연구에서 적용한 헤드의 사양을 나타낸 것이다.

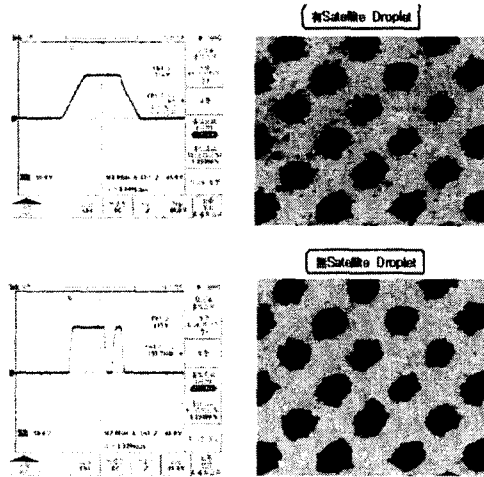
명칭	단위 [값]
노즐수	764 개
프린터 길이	53.8 mm
해상도	360 dpi
Gray level	6 level (0 ~ 5)
Sub-Drop 크기	8 pi
Max-Drop 크기	40
Drop 속도	6.0 m/s
최대 분사 주파수	8 KHz
외형 치수 (W X D X H)	86 X 33.3 X 63.5 mm
프린트 헤드 무게	130 g
프린터 헤드 높이	1mm
잉크 종류	UV, 솔벤트

그림 9(a)는 잉크방울 형성을 위한 기존 전압파형 패턴이며 그림 9(b)는 미디어의 Satellite저감을 위해 개선된 전압파형 형성을 제시하였다.



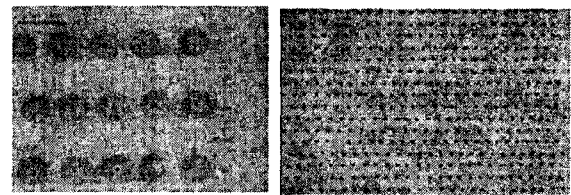
<그림 9> 잉크젯을 위한 전압 파형의 비교

그림 10(a)는 기존 전압파형 패턴으로 구동시 미디어 출력의 Satellite를 나타낸 것이며, 그림 10(b)는 개선된 전압파형 패턴 인가시 미디어의 Satellite가 저감된 결과를 나타낸 것이다.



<그림 10> 전압파형 개선 전, 후의 Satellite 비교

그림 11은 원단 미디어 Avery에 UV경화잉크를 사용하여 잉크공급 차압 -2.5[kPa], V_{trim}=40/30(A Nozzle / B Nozzle), 구동주파수 1[kHz], 헤드높이 1[mm], 속도 6[m/s]에서 잉크젯 드롭제어 분사결과를 나타낸 것으로 600배 확대된 모형이다.



(a) 확대된 드롭

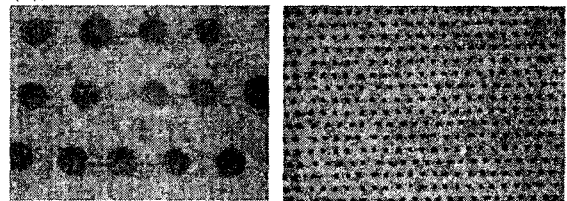
(b) 분사된 드롭량

Index	Tools	S1(면적1)	S2(면적2)	OCL(계체중심간거리)
0	두 원의 중심간 거리	3063.9	3236.4	87
1	두 원의 중심간 거리	2896	3063.9	87
2	두 원의 중심간 거리	3236.4	3063.9	91
3	두 원의 중심간 거리	3236.4	3063.9	137
4	두 원의 중심간 거리	3063.9	3063.9	139

(c) 드롭크기의 데이터

<그림 11> 1 [kHz]의 1grey-scale에서 잉크드롭 측정결과

그림 12는 그림 11과 동일한 조건에서 구동주파수만 8[kHz] 인가시 특성 결과이다.



(a) 확대된 드롭

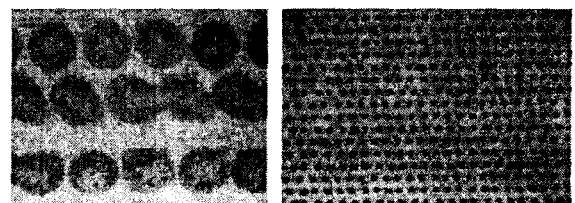
(b) 분사된 드롭량

Index	Tools	S1(면적1)	S2(면적2)	OCL(계체중심간거리)
0	두 원의 중심간 거리	5026.5	3217	135
1	두 원의 중심간 거리	4071.5	2642.1	172
2	두 원의 중심간 거리	4071.5	4309.8	124
3	두 원의 중심간 거리	3421.2	3217	151
4	두 원의 중심간 거리	3019.1	3631.7	154

(c) 드롭크기의 데이터

<그림 12> 8[kHz]의 1grey-scale에서 잉크드롭 측정결과

그림 13은 8[kHz] 5 grey-scale에서 드롭 분사의 측정결과이다.



(a) 확대된 드롭

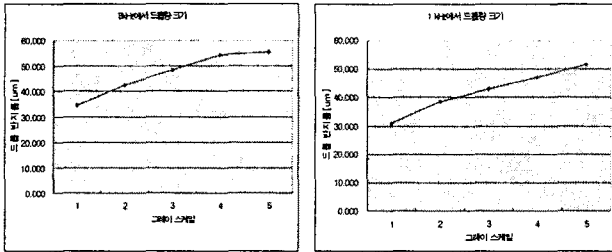
(b) 분사된 드롭량

Index	Tools	S1(면적1)	S2(면적2)	OCL(개체중심간거리)
0	두 원의 중심간 거리	3063.9	3236.4	87
1	두 원의 중심간 거리	2896	3063.9	87
2	두 원의 중심간 거리	3236.4	3063.9	91
3	두 원의 중심간 거리	3236.4	3063.9	137
4	두 원의 중심간 거리	3063.9	3063.9	139

(c) 드롭 크기의 데이터

<그림 13> 8[kHz]의 5 grey-scale에서 잉크드롭의 측정결과

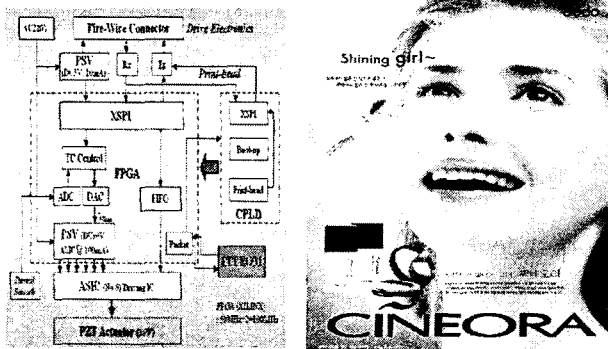
그림 14(a)는 구동주파수 1[kHz]에서 그레이스케일에 대한 드롭량 크기를 분석한 결과를 나타낸 것이며, 그림 14(b)는 최대 8[kHz]에서 그레이스케일에 대한 드롭량 크기 분포를 나타낸 것이다.



(a) 1 kHz 드롭 (b) 8 kHz 드롭
<그림 14> Grey-scale에 대한 드롭 량 크기 비교

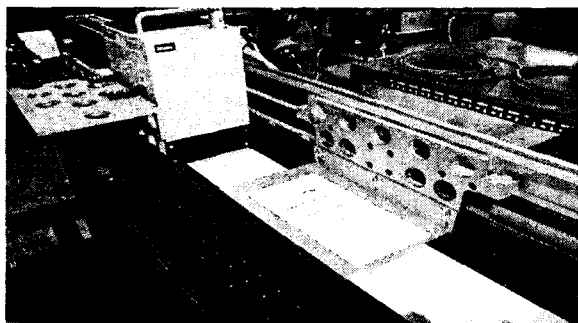
여기서 1[kHz]에 비해서 고주파수 8[kHz]에서 또한 그레이스케일에 높을 수록 드롭 량이 증가함을 알 수 있었다.

그림 15(a)는 드롭제어를 위한 하드웨어의 블록선도를 나타낸 것이며, 그림 15(b)는 구현된 실험장치로 최적 드롭제어에 의해 4할라로 출력된 이미지 출력결과를 나타낸 것이다.



(a) 하드웨어 블록도 (b) 이미지 출력
<그림 15> 하드웨어 및 이미지출력 측정결과

그림 16은 이미지를 출력을 위해 자체 제작한 측정시스템의 구조를 나타낸 것이다. 여기서 실험조건은 다음과 같다. 압전 액추에이터 구동전압은 최대 약 40V, 부하시 최대 전류 250mA, 헤드당 소비전력 9.5W, UV잉크 점성도 18.9 mPa, 헤드 물 순환온도 약 35°C로 실험하였다.



<그림 16> 이미지 측정 시스템

4. 결 론

본 논문에서는 산업용 잉크젯 플로터에서 적용되는 중요한 잉크분사 장치인 Shear 모드 압전 세라믹 헤드에 대한 구동원리, 특성해석 및 이론정립을 하였다. 이를 위하여 유한요소법을 이용하여 특성해석 하였다. 압전 세라믹에 의한 임펄스제어(Drop on Demand)를 통하여 원하는 잉크형성 드롭제어

어를 구현하였다. 최적제어를 위해 원단에 잉크 드롭 분사시 잔 드롭(Satellite)을 저감할 수 있는 개선 파형 패턴을 제시하여 미디어에 분사시 잔상을 저감하도록 구성하였다. 그레이스케일(greyscale) 기법을 적용하여 잉크방울의 크기를 조절함으로써 고 선명도를 실현하였다. 실험결과 주파수가 증가하고 그레이스케일이 증가할수록 드롭 량이 증가함을 실험결과를 통하여 알 수 있었다. 앞으로 약간의 미 진한부분은 더욱 보완하면 이러한 잉크젯 프린팅 기술은 육내외용 실사출력 및 기타 다양한 응용 기기에 적용될 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Herman Wijshoff "Free surface flow and acousto-elastic interaction in piezo inkjet", 5900 MA Venlo, the Netherlands.
- [2] K. Uoshimura, M. Kishimoto, T. Suemune, "Inkjet Printing Technology", OKI Technical Review Vol.64, pp41-44. August 1998.
- [3] Y. Takeuchi, H. Takeuchi, K. Komatsu, S. Nishi, "Improvement of Drive Energy Efficiency in a Shear Mode Piezo Inkjet Head",
- [4] S. Kamisuki, T.Hagata, C.Tezuka, Y.Nose, M.Fujii, and M. Atobe, "A low Power, Small, Electro-statically Driven Commercial Inkjet Head", IEEE Trans. pp63-68, 1998.
- [5] F. G. Tseng, C. J. Kim, and C.M. Ho, "A High Resolution High-Frequency Monolithic Top-Shooting Microinjector Free of Satellite Drops-Part I : Concept, Design, and Model. Journal of Microelectromechanical System, Vol.11, No.5, pp 427-436, October 2002
- [6] F. G. Tseng, C. J. Kim, and C.M. Ho, "A High Resolution High-Frequency Monolithic Top-Shooting Microinjector Free of Satellite Drops-Part 2 : Fabrication, Implementation, and Characterization", Journal of Microelectromechanical System, Vol.11, No.5, pp 437-447, October 2002

본 연구는 산업자원부의 우수제조기술연구센터(ATC)사업의 개발자금으로 수행되었습니다.