

3차원 물방울 조각 생성장치의 구현을 위한 물방울 생성기법

임용춘⁰ 박연용[†] 정문열^{*}

서강대학교 영상대학원 / 아트앤테크놀로지 학과

ryongchun@sogang.ac.kr, viabrera@hanmail.net, moon@sogang.ac.kr

Water droplet generation technique for 3D water drop sculptures

Long-Chun Lin⁰ Yeon-yong Park[†] Moon Ryul Jung^{*}

Graduate School of Media / Dept of Art & Technology

Sogang University

요 약

본 논문은 3차원 물방울 조형 생성장치로 구현된 3차원 물방울 조형을 생성할 때 위성 물방울이 생성되지 않고 형상 왜곡이 일어나지 않으면서 조형의 해상도를 최대한으로 높일 수 있는 기법을 제안한다. 3차원 물방울 생성장치는 보통 표현하고자 3차원 조형을 등 간격으로 배치된 슬라이스들의 집합으로 이산화하여 표현하고 각 슬라이스를 순서대로 읽어 각 슬라이스를 실현하는 물방울을 솔레노이드 밸브를 개폐하여 생성한다. 각 슬라이스의 해상도는 솔레노이드 노즐 매트릭스의 해상도와 같다. 본 논문에서는 위성 물방울이 생성되지 않으면서 형상의 왜곡도 생기지 않는 새로운 기법 두 가지를 제시하고자 한다. 첫째 방법은 등간격 기법이라고 하는데, 등간격으로 배치된 각 슬라이스를 생성하는 시점을 조절하여 중력에 의해 시간이 지날수록 물방울의 속도가 빨라지더라도 조형 전체가 다 형성되는 순간에 물방울 슬라이스들이 등 간격을 유지하게 하여 원래의 형상이 왜곡되는 것을 방지한다. 두 번째 방법은 최소시간 간격 기법이라고 하는데, 3차원 조형을 슬라이스로 이산화시킬 때, 슬라이스를 등 간격으로 배치하는 것이 아니라 가능한 한 촘촘하게 배치한다. 중력을 고려하여 조형 위쪽으로 갈수록 슬라이스를 더 촘촘하게 배치하고, 아래로 내려올수록 슬라이스 간의 간격이 늘어나게 배치한다. 이때 주어진 노즐의 성능 한도 내에서 최대한 촘촘하게 불균등 간격 슬라이스를 배치하고 조형이 완성되는 시점에 이 간격이 실현되게끔 노즐 개폐를 제어한다. 이 방법을 구현하기 위해 주어진 물방울 생성장치의 솔레노이드 밸브가 위성 물방울 생성 없이 인접한 두 물방울을 연달아 생성하는데 필요한 최소 시간 간격 (노즐 오픈 명령후 노즐이 완전히 오픈되는데 걸리는 시간과 완전 오픈상태를 유지하는 시간, 그리고 노즐 클로즈 명령후, 노즐이 완전히 클로즈 되는데 걸리는 시간의 합) 을 실험으로 구했다. 두 번째 방법은 첫 번째 방법에 비해 조형의 해상도가 상당히 증가하는 장점이 있다.

Abstract

This paper presents two new techniques for solving the two problems of the water curtain: 'shape distortion' caused by gravity and 'resolution degradation' caused by fine satellite droplets around the shape. In the first method, when the user converts a three-dimensional model to a vertical sequence of slices, the slices are evenly spaced. The method is to adjust the time points at which the equi-distance slices are created by the nozzle array. In this method, even if the velocity of a water drop increases with time by gravity, the water drop slices maintain the equal interval at the moment of forming the whole shape, thereby preventing distortion. The second method is called the minimum time interval technique. The minimum time interval is the time between the open command of a nozzle and the next open command of the nozzle, so that consecutive water drops are clearly

*corresponding author: Moonryul Jung/Sogang University Graduate School of Media(moon@sogang.ac.kr)

created without satellite drops. When the user converts a three-dimensional model to a sequence of slices, the slices are defined as close as possible, not evenly spaced, considering the minimum time interval of consecutive drops. The slices are arranged in short intervals in the top area of the shape, and the slices are arranged in long intervals in the bottom area of the shape. The minimum time interval is pre-determined by an experiment, and consists of the time from the open command of the nozzle to the time at which the nozzle is fully open, and the time in which the fully open state is maintained, and the time from the close command to the time at which the nozzle is fully closed. The second method produces water drop sculptures with higher resolution than does the first method.

키워드: 3차원 물방울 생성장치, 위성 물방울, 등 간격 기법, 최소 시간 간격 기법

Key word: 3D Water Curtain System of 3D, satellite droplets, Equal interval technique, Minimum time interval technique

1. 서론

본 연구는 관람자에게 한층 더 선명한 3차원 물방울 조형을 3차원 물방울 조형 생성장치로 구현하고 제공하기 위한 연구로, 기존의 국내외 2D, 3D 물방울 생성장치의 사용사례를 분석하였다. 이를 통하여 구현하고자 하는 조형을 이산화하여 물방울로 조형을 구현한다. 하지만 전통기법은 중력가속도에 의한 형상의 왜곡과 의도하지 않고 생성된 위성 물방울들로 인하여 해상도 저하되는 등, 약점이 있으므로 기존의 물방울 생성장치가 가지고 있는 대표적인 두 가지 문제를 해결할 수 있는 기법을 연구한다.

1.1 국내외 기술 현황

최초로 개발된 2D 물방울 생성장치는 2007년 MIT에서 개발하여 Digital Water Pavilion라는 작품으로 Expo Zaragoza에서 대중들에게 처음으로 선보였다<Figure 1>. 규모나 형태의 변화에서 당시 최고라고 하지만 3D 조형 표현은 불가능하다. 물방울 조형이 위에서 아래로 내려갈수록 중력가속도에 의한 물방울의 속도 차이가 늘어나면서 전체적인 형상 왜곡이 심하고 의도한 물방울 생성의 많은 위성 물방울들이 생성된다<Figure 4>. 현재 상용되고 있는 물방울 조형 생성장치는 각 노즐을 열어 일정 시간 유지하여 물줄기 (엄밀하게는 물방울들의 시퀀스)를 생성하는데 이방법은 형상왜곡과 위성물방울 생성을 야기한다 [1].



Figure 1 Digital Water Pavilion

3D 물방울 생성장치에 대한 구상은 2001년 일본의 Shiro Takatani가 시작하였으나, 당시의 기술력으로 실현되지 못하고 2014년 Digital water curtain 사에 의하여 파리에서 처음으로 <Figure 2>와 같은 3차원 물방울 생성장치

를 발표하였다.



Figure 2 Digital water curtain company's 3D Water Curtain System

Digital water curtain사에서 발표한 3차원 물방울 생성장치는 가로 30개, 세로 30열로 총 900개의 밸브와 노즐을 사용하였으나 저해상도와 위성 물방울 생성에 의한 노이즈가 심하게 발생하였으며 중력에 따른 물방울 상하 높이 변화에 의한 형태 왜곡이 심하다. 2D 물방울 생성장치가 가지고 있던 문제를 극복하지 못하고 같은 문제가 상시 발생하고 있다는 점에서 아직 완벽한 3D 물방울 조형이라고 말할 수 없다. 2017년 5월 30일에 제작발표를 한 Unit9팀의 3차원 물방울 생성장치에서도 같은 문제가 발생했다<Figure 4>.

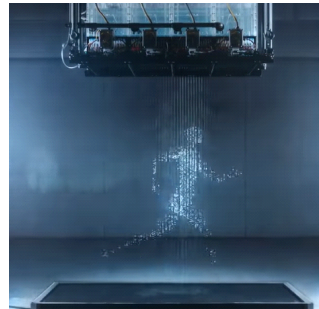


Figure 3 Unit9 team's 3D Water Curtain System.

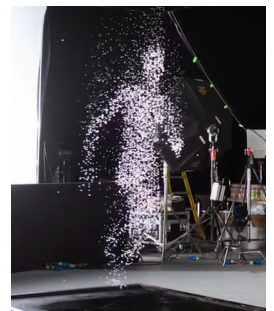


Figure 4 Satellite water droplets are produced a lot.

1.2 연구의 필요성 및 목적

기존의 물방울 생성장치에서 발생하고 있는 문제는 중력가속도에 의한 형상이 왜곡되는 것과 의도된 물방울 외 위성 물방울이 대량으로 생성되어 형상에 선명도가 저하되는

두 가지 큰 문제가 있다.

1. 형태의 왜곡

기존의 기법을 이용한 물방울 조형은 중력가속도에 의해 수직 방향으로 낙하하면서 물방울 사이의 간격은 점점 커진다. <Figure 6> 와 같이 물방울로 분리되는 과정에서 물방울의 크기가 서로 달라 물방울 낙하속도 차이로 물방울 사이의 거리는 더 큰 차이가 생기므로 왜곡은 더 심해질 수밖에 없다.



Figure 5 The original image that the user wants to implement with water drops.



Figure 6 The image represented by water drops, distorted by gravity.

2. 위성 물방울의 생성

위성 물방울이란 형상을 표현하기 위하여 생성한 물방울 외에 랜덤하게 생성된 미세한 물방울을 말한다 (<Figure 7>). 물줄기를 생성하는 방법에서는 필연적으로 위성 물방울이 생성되며, 이를 방지하려면 그림 <Figure 8>에서처럼 개개의 물방울을 생성해야 한다.

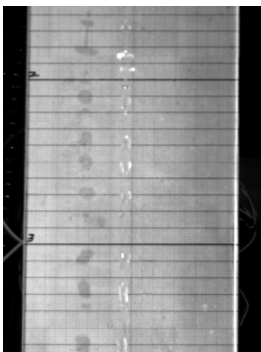


Figure 7 The method to generate water column tend to create satellite drops.

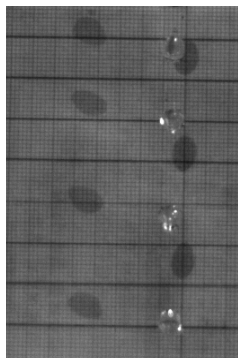


Figure 8 The method to generate individual water drops does not tend to create satellite drops.



Figure 9 The “equi-distance” method of generating equi-distance slices at the moment when the whole shape is formed.



Figure 10 The “minimum time interval” method where the distances between the adjacent slices are not uniform and minimum.

따라서 본 논문에서는 위의 두 문제들을 해결하는 두가지 기법을 제안한다. 특정 구간에서 등 간격 슬라이스를 가지는 물방울 조형을 형성하는 “등간격” 기법 (<Figure 9>) 과 이 기법보다 복잡하지만 물방울 해상도를 높이는 “최소시간간격” 기법 (<Figure 10>) 이다.

2. 물방울 생성 메커니즘에 대한 이해

등 간격 및 최소 시간 간격 기법은 3차원 조형을 등 간격 혹은 불균등 간격으로 배치된 슬라이스들의 집합으로 이산화하여 조형이 완성되는 시점에 이 간격들이 실현되어 중력에 의한 형태왜곡을 회피한다. 이 기법들은 물방울 생성을 컴퓨터 프로그램에서 완전히 제어한다는 것을 전제로 한다. 따라서 물방울 생성 메커니즘을 이해할 필요가 있다.

2.1 물방울 생성 과정

노즐 끝단에 물기둥이 생성되면서 물기둥의 무게가 증가 되면 물기둥이 진동운동을 하게 되고, 특정 지점에서 분리되어 물방울이 생성되어 낙하한다 (<Figure 11>). 수도꼭지에서 물방울 생성되는 메커니즘과 같다 (<Figure 12>). 수도꼭지에서 물기둥이 생기고 물기둥이 물에 작용하는 점성, 표면 장력 그리고 중력의 상호작용으로 의해 수직 방향으로 진동하다가 물기둥 아랫부분이 약해지면서 분리되어 물방울이 생성된다.

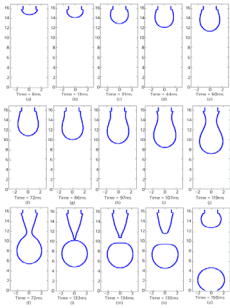


Figure 11 The process of water drop generation[3]



Figure 12 Water drops form from the faucet and fall.

2.2 솔레노이드 밸브, 및 노즐

솔레노이드 밸브는 2D 물방울 생성장치 및 입체 조형을 생성하는 3D 물방울 생성장치 중에서도 중요한 구성 요소이다[2]. 실험에 사용하는 솔레노이드 밸브<Figure 13>는 크게 전자코일, 코어, 코어 스프링 등으로 구성되었으며 전기가 공급되면 전자코일의 전자력으로 코어를 당겨 입구가 개방되고 전기가 끊기면 코일의 전자력이 사라져 코어 속의 코어 스프링에 의하여 다시 내려가 입구를 폐쇄하는 직동식 솔레노이드 밸브이다 <Figure 14> . 밸브의 개폐를 통한 통제 가능한 물방울을 생성하기 위하여 위성 물방울 없이 하나의 물방울을 생성하는데 필요한 최소시간을 발견해야 한다.

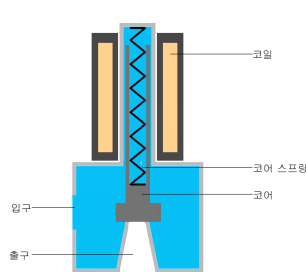


Figure 13 Solenoid valve cross sectional view



Figure 14 Solenoid valve



Figure 15

table 1

	응답속도 (개폐)ms	정격전 압 V	출력 W	입구크기 mm	출구크기 (내경) mm
솔레노이드 밸브	15	48	12.8	8	4
노즐					4

2.3 솔레노이드 밸브의 개폐 시간

<Table 1>와 같이 대부분의 제조사는 솔레노이드 밸브의 한번 완전히 개방<Figure 16>하고 바로 완전히 폐쇄<Figure 17>하는 시간을 응답속도라고 하며 fully opening time^①과 ① fully opening time은 밸브가 완전히 닫혀있는 상태에서 개방 신호를 인가하는 시점으로부터 코어가 위까지 도달하는데 걸리

fully closing time^②을 따로 측정하지 않는다. 하지만 물방울 생성을 완전히 제어하기 위해서는 솔레노이드 밸브를 완전히 개방하는데 필요한 시간과 개방 상태에서 완전히 폐쇄하는데 필요한 시간을 알아야 한다.

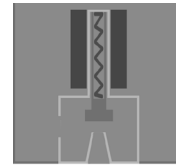


Figure 16 fully opening

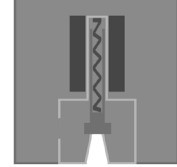


Figure 17 fully closing

완전한 개폐를 하는 시간을 각각 측정하기 위하여 초고속카메라를 이용하여 open 신호가 인가되는 시점을 기준으로 밸브의 개방과 폐쇄 하는데 필요한 시간을 측정하는 실험을 하였다. 신호가 인가되는 시점을 알기 위하여 디코더<Figure 19>의 LED를 사용하였다. 디코더는 솔레노이드 밸브를 제어하기 위하여 컴퓨터에서 시리얼 통신으로 아두이노에 개폐 신호를 보내고 아두이노에서 다시 SPI 통신으로 디코더에 신호를 보내는 제어신호시스템을 구성하는 부품이다. 디코더의 LED는 솔레노이드 밸브에 open 신호가 인가되면 점등되어 있고 close 신호가 인가되면 점멸한다. 신호 설정은 open 신호를 주고 15ms 시간 동안 대기하고 바로 close 신호를 준다. 초고속카메라는 1s/2000fps로 설정하였으며 프레임과 프레임 사이의 간격이 0.4ms이므로 오차범위는 0.4ms이다.



Figure 18 experiment device

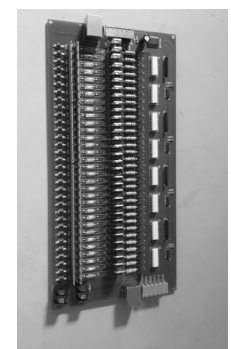


Figure 19 Decoder

실험결과 open 신호를 주는 시간을 기준으로 솔레노이드 밸브가 완전한 open을 하는데 필요한 시간은 약 6ms이며 완전한 close를 하는데 필요한 시간은 약 8ms로 확인된다. 실험 과정에서 open 신호를 주고 약 1ms 동안 코어는 움직이지 않는데 이는 1ms 동안 코일에 전류가 흐르고 자기장

② fully closing time은 밸브가 완전히 열려있는 상태에서 폐쇄 신호를 인가하는 시점으로부터 코어가 아래까지 도달하는데 걸리는 시간.

을 형성하는데 필요한 시간이다. close 신호를 주고 약 1ms 동안 코일이 가지고 있는 자성을 소멸하고 코어가 내려오기 시작한다 <Figure 20, 21, 22, 23>.



Figure 20 Top right: T:0ms, F: 0fps
The left side is when the core is fully closed.

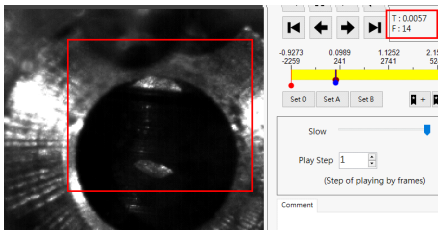


Figure 21 The core is fully opened.
T: 0.0057s, F:14

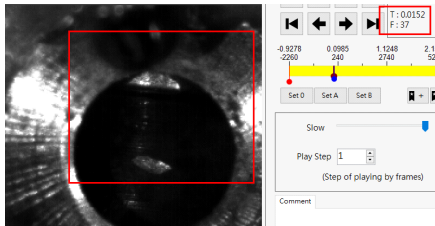


Figure 22 When the close signal is applied in the fully open state T: 0.0152s, F: 37fps

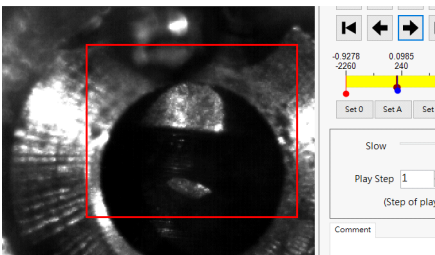


Figure 23 The core is fully closed.
T: 0.023s, F:56fps

2.4 물방울 생성 최소 시간 간격 측정 실험

특정 구간에서 왜곡이 없는 물방울 조형을 형성하기 위하여, 즉 등 간격 기법과 최소 시간 간격 기법을 사용하기 위하여 물방울 생성장치의 솔레노이드 밸브가 위상 물방울 생성 없이 인접한 두 물방울을 연달아 생성하는데 필요한 최소 시간 간격을 측정하는 실험이다. 실험장치는 <Figure 25>, <Figure 26> 과 같다.

초고속카메라는 1s/1000fps로 설정하였으며 오차범위는 1ms이다. 이때 수압은 유량에 영향을 주게 되므로 수위를 30cm(약 0.0294bar)로 유지하였고 노즐의 높이는 지면으로부터 약 2m 위치에 설치하였다. 솔레노이드 밸브의 open delay^③는 각각 7ms~ 20ms로 설정하고 close delay^④는 8ms로 동일하게 설정하였다. <Figure 24>와 같이 물방울 생성시간은 물방울이 노즐의 끝단에서 분리되는 시점을 의미한다. 단일 물방울 생성은 open 신호가 인가되고 다음 물방울 생성을 위한 open 신호가 인가된 후 물방울로 분리되는 것을 확인할 수 있다. 폐쇄시간을 8ms로 설정한 이유는 코어가 완전히 폐쇄하는데 필요한 시간이 약 8ms이므로 완전히 폐쇄한 상태에서 다음 개방 신호를 주기 위해서 10ms로 설정하였다. 매회의 실험에서 총 4개의 물방울이 형성된다. 이유는 한 개를 생성하여 측정한 결과에 비교해 연속으로 물방울 생성 시 첫 번째 물방울과 다음 물방울이 서로에게 영향을 줄 수 있는 변수가 생길 수 있기에 정확한 측정 결과를 위하여 물방울 4개를 생성하는 실험 방법을 선택하였다. <Figure 26> 와 같이 컴퓨터에서 시리얼 통신으로 아두이노에 코드를 upload 하고 아두이노에서 SPI 통신으로 디코더에 신호를 보낸다. SPI 통신을 사용하는 이유는 최고 70MHz에 이르는 빠른 통신 속도와 데이터 단위에 대한 제약이 없어서 8bit로 원하는 길이를 한 워드로 설정할 수 있는 것이다. 3차원 물방울 조형 생성장치는 많은 양의 솔레노이드 밸브를 사용하기에 SPI 통신이 적합하다. 실험에 사용하는 아두이노 코드는 다음과 같다.

```
#include <SPI.h> // 아두이노에서 SPI통신을 사용
int Solenoid_valve = 10; //아두이노 10번 디지털 핀으로 제어
신호를 보낸다.

byte sendBuffer[4];
void setup(){
    Serial.begin(9600);
    pinMode(Solenoid_valve, OUTPUT);
    SPI.begin();
    SPI.setBitOrder(MSBFIRST);
}

void loop(){
    // open 신호를 보내고 14ms 동안 유지한다.
    memset(sendBuffer, 0xff, 4);
    digitalWrite(Solenoid_valve, LOW);
    SPI.transfer(sendBuffer, 4);
    digitalWrite(Solenoid_valve, HIGH);
    delay (14);
    //close 신호를 보내고 10ms 이후 다시 open 신호를 보낸다.
    memset(sendBuffer, 0x00, 4);
    digitalWrite(Solenoid_valve, LOW);
```

③ open delay는 open 신호를 보내는 시점으로부터 close 신호를 보내기 전까지의 시간을 의미.

④ close delay는 close 신호를 보내는 시점으로부터 open 신호를 보내기 전까지의 시간을 의미.

```

SPI.transfer(sendBuffer, 4);
digitalWrite(Solenoid_valve, HIGH);
delay (10); }

```

특정 구간에서 왜곡 현상이 없는 조형을 형성하기 위한 물방울의 조건은 다음과 같다. 첫째, 하나의 물방울을 생성하는데 필요한 시간은 짧으면 좋다. 이는 물방울과 물방울 사이의 거리와 비례하기에 물방울 사이의 간격이 짧을수록 정해진 높이에서 생성할 수 있는 물방울의 개수가 증가하여 높은 해상도를 만들 수 있는 필수 조건이다. 둘째, 물줄기에서 물방울로 분리되는 과정에서 위성 물방울이 생기지 말아야 한다. 이는 물방울의 부피가 너무 크면 분리되는 과정에서 위성 물방울이 생길 수 있으며 또한 물방울이 2m 높이에서 자유 낙하를 하는 과정에서 물방울 자체의 표면 장력과 점성이 저항력보다 작으면 작은 위성 물방울로 분리될 수 있기에 일정한 부피를 초과하지 말아야 한다<Figure 27>. 셋째, 연속적인 물방울을 생성하여 특정 구간에서의 등 간격을 만들어야 하기에 물줄기에서 분리된 물방울들의 부피는 최대한 일치해야 한다. 물방울의 부피가 서로 다르면 중력가속도에 의하여 낙하하는 물방울들의 속도 차이에 의하여 물방울 사이의 간격에 큰 차이가 생긴다.

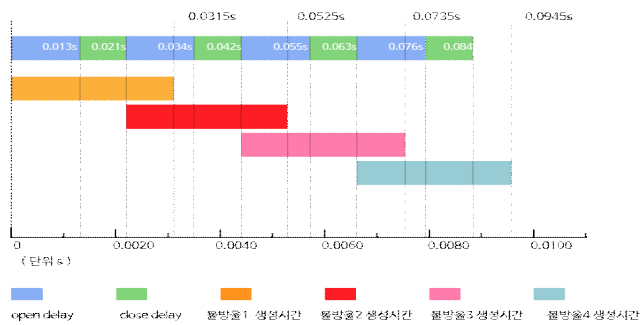


Figure 24 The event relationship when the open delay time is set to 14 ms (from the time of open command to the time at which the nozzle is fully open (6ms) + the time interval in which the fully open state is maintained (8ms)) and the close delay time (from the time of close command to the time at which the nozzle is fully closed) is set to 8 ms; a total of four drops of water separated from the tip of the nozzle are sequentially generated.

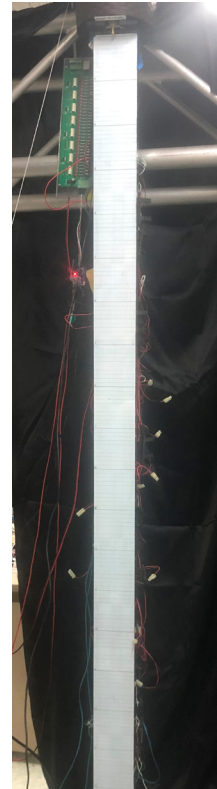


Figure 25 Experiment device

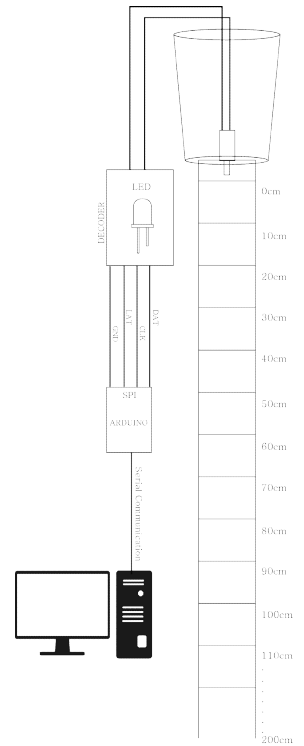


Figure 26 Experimental device layout

Table 2

	물방울 생성시간(ms)	물방울 지름 (mm)	위성 물방울 유무
7ms			
8ms	46.1	3.6	o
9ms	37.7	4	o
10ms	37.7	4.3	o
11ms	34.6	4.5	x
12ms	33.6	5.1	x
13ms	31.5	5.2	x
14ms	33.6	5.4	x
15ms	34.6	5.7	o
16ms	36.7	6.1	o
17ms	36.7	6.3	o
18	37.7	6.6	o
20ms	37.7	7	o

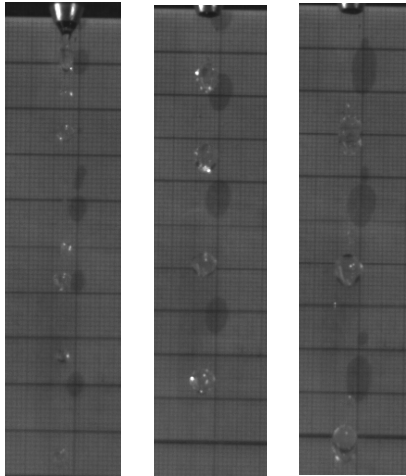


Figure 27 open delay 7ms, close delay 10ms
Figure 28 open delay 13ms, close delay 10ms
Figure 29 open delay 20ms, close delay 10ms

실험결과 솔레노이드 밸브의 open delay를 7ms로 설정했을 경우 첫 번째 물방울을 형성할 수 있는 물의 양이 부족하여 물방울은 노즐 밑단에 머물러 있다가 두 번째 물방울 개방시간까지 물줄기에서 분리할 수 있는 물의 양을 보충하고 낙하하는 악순환이 계속되는 것이 확인된다<Figure 29>. 솔레노이드 밸브의 open delay를 16ms~20ms로 설정한 물방울은 개방시간이 긴 이유로 물방울의 부피가 너무 커져 물줄기에서 물방울로 분리되는 과정에서 위성 물방울이 생성된다. 따라서 특정 구간에서의 왜곡이 없는 물방울 조형의 형성을 위한 적합한 물방울을 생성하기 위한 솔레노이드 밸브의 open delay는 13ms로<Figure 28> 확인된다. 이 결과는 수압이 약 0.0294bar로 유지했을 때의 경우이다. 수압은 솔레노이드 밸브의 특정 부피의 물방울을 생성하는데 필요한 개폐 시간에 영향을 준다.

이 결과는 수위를 30cm로 유지했을 때의 경우이다. 수위를 유지하는 이유는 수압이 솔레노이드 밸브의 개폐 시간에 영향을 주기 때문에 0.0294bar의 수압을 유지하였다.

솔레노이드 밸브는 수조의 밑단에 설치하였기에 수조의 수압은 솔레노이드 밸브의 특정 부피의 물방울을 생성하는데 필요한 개폐 시간에 영향을 준다. 수위 즉 수압이 솔레노이드 밸브의 개폐 시간에 영향을 주는 것을 증명하기 위하여 <Table 4>와 같이 open delay를 13ms로, close delay를 8ms로 설정하여 실험하였다. 실험결과 수위가 30cm인 경우 open delay를 13ms로, close delay를 8ms로 설정 시 전부 안정적으로 물방울을 생성하였으며 open delay를 13ms로 설정한 경우 물방울 생성시간이 제일 짧다. 수위가 25cm 이하로 유지했을 경우 open delay를 13ms, 설정했을 경우 수압의 감소로 인해 솔레노이드 밸브의 개폐 시간이 부족한 것을 확인할 수 있다. 따라서 수조의 수위가 물방울을 생성하는 과정에 큰 영향을 준다는 것을 확인할 수 있다.

수위 (cm)	지름 (mm)	물방울 생성시간(ms)			
		1	2	3	4
30	5.2	31.5	31.5	31.5	31.5
25	5	44.1	31.5	34.7	33.6
20	4.8	34.6	35.7	46.2	33.6
15	측정 불가				
10					
5					
open delay time 13ms/close delay time 8/ 4 times					

Table 4 The open delay was set to 13ms and the close delay was set to 8ms

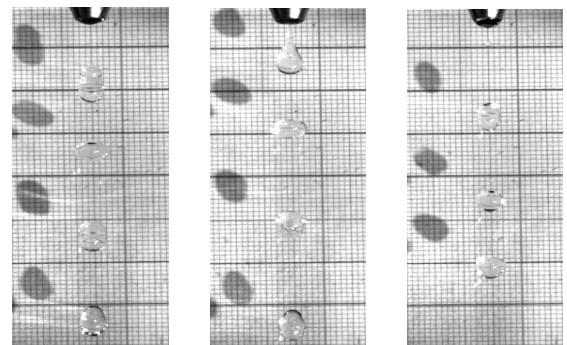


Figure 30 open delay 13ms, close delay 8ms, When the water level is 30cm, water droplets are generated stably.
Figure 31 open delay 13ms, close delay 12ms, When the water level is 30cm, water droplets are generated stably.
Figure 32 open delay 13ms, close delay 8ms, When the water level is 15cm, water droplets are generated stably.

수조의 높이를 높이면 물방울을 생성하는 시간을 단축할 수 있으면 따라서 물방울과 물방울 사이의 거리를 축소할 수 있다. 그러나 장치설계에 있어서 과도한 수조의 높이는 장치의 무게와 부피를 증가하여 설치, 및 장치 이용이 어렵다. 따라서 장치설계에 있어서 필요한 높이에 해당하는 수위를 정하고 실험하였다.

2.5 물방울 생성후 경과시간과 낙하거리간의 관계식 도출을 위한 실험

본 실험의 목적은 2m 구간에서 20개의 물방울의 등 간격을 만들기 위하여 물방울 한 개가 노즐 끝단에서 형성되는 시점부터 10cm 간격으로 떨어져 있는 위치에 도달할 때 소요되는 시간을 측정하여 물방울 생성후 경과시간과 낙하거리간의 관계식을 유도하기 위한 것이다. 물방울 낙하 실험은 단일 물방울 생성을 위한 최소시간간격을 구하는 실험과 동일한 조건을 사용하였다. 초고속카메라를 1s/1000fps로 설정하여 측정하였다. open delay time 은 13ms,

close delay time은 8ms로 설정하고 시간으로 연속된 4개의 물방울을 생성하여 측정하였다. 4개의 물방울이 모두 동일한 낙하과정을 거치는 것이 확인되었다. 실험은 총 20회를 실시하였다. 측정결과는 <Table 4>와 같다.

Table 4

거리(cm)	0	1	2	4	6	8
경과시간(ms)	31.5	51.8	65.1	85.5	101.2	116.9
거리(cm)	10	20	30	40	50	60
경과시간(ms)	131.3	184.3	228.9	266.3	298.8	328.9
거리(cm)	70	80	90	100	110	120
경과시간(ms)	357.8	384.3	409.6	433.7	456.6	478.3
거리(cm)	130	140	150	160	170	180
경과시간(ms)	500	520.5	539.8	559	577.1	595.2
거리(cm)	190	200				
경과시간(ms)	613.3	630.1				

Matlab 프로그램으로 <Table 4>의 수치를 이용하여 계수를 구하는 방법은 다음과 같다. <Figure 33>과 같이 Matlab에서 polyfit() 함수를 이용하여 경과시간 x 와 낙하거리 y 간의 2차함수식을 구하였다. 시간과 낙하거리간의 관계는 중력 법칙에 의해 2차함수로 표시될 수 있다는 합리적인 가정을 했다.

```

x=[31.5 51.8 65.1 85.5 101.2 116.9 131.3 184.3 228.9 266.3 298.8 328.9 357.8 384.3 409.6
433.7 456.6 478.3 500 520.5 539.8 559 577.1 595.2 613.3 630.1];
y=[0 1 2 4 6 8 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 160 170 180 190 200];
p=polyfit(x,y,2);
x1=linspace(33.6,10000,10000);
y1=polyval(p,x1);
figure
plot(x,y,'o')
hold on
plot(x1,y1)
hold off
text(150,200,'$y=ax^2+bx+c$', ...
'interpreter','latex');
```

Figure 33 Using Matlab

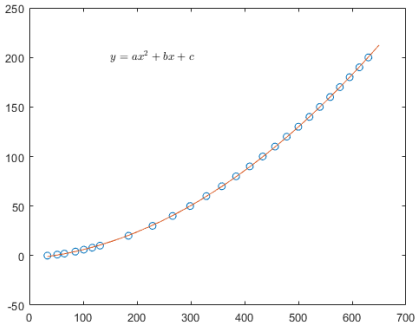


Figure 34 It is a quadratic function graph obtained from Matlab using experimental results. y is the drop height and x is the time it takes to reach that height.

위 실험을 통하여 구한 계수로 2차 방정식을 이용하여 <Figure 35>과 같이 물방울 사이의 간격은 12cm를 유지하면서 특정 구간에서의 등 간격을 형성하였다. 물방울 사이의 간격을 12cm로 설정했을 경우 등 간격을 유지하게 하여 원래의 형상이 왜곡되는 것을 방지하는 것은 해결했다. 그러나 물방울 사이의 등 간격을 유지하기 위하여 수직 구간의 물방울 해상도에서 손해를 볼 수밖에 없다.

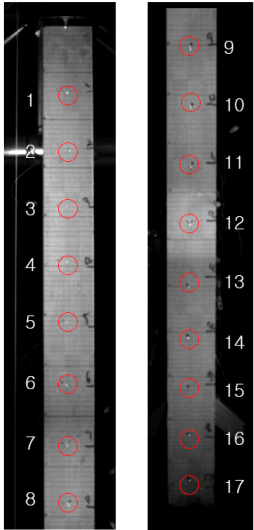


Figure 35. 17 equally spaced droplets

수직 구간의 물방울 해상도를 높이기 위하여 위 결과를 토대로 솔레노이드 밸브가 단일 물방울 생성기범으로 연속적으로 물방울을 생성하는 open 신호와 다음 물방울 생성하기 위한 open 신호 사이의 최소 시간, 즉 open delay 13ms, close delay 8ms의 합인 21ms로 연속된 물방울을 생성하였을 때 2m 범위 안에서의 물방울 위치를 <Figure 36>와 같이 슬라이스 그리드를 형성하였다. 이와 같은 슬라이스 그리드를 이용하여 구현하고자 하는 물방

을 조형의 물방울 위치를 알 수 있으므로 특정 구간에서 왜곡이 없는 물방울 조형을 형성할 수 있다.

높은 해상도를 생성하기 위하여, 즉 수직 방향에서의 물방울과 물방울 사이의 간격을 축소하기 위하여 현재 사용 중인 밸브보다 짧은 개폐 시간을 실현할 수 있는 솔레노이드 밸브를 사용하거나 수위를 높여 수압을 증가 시킴으로써 물방울 생성시간을 단축하여 물방울 사이의 간격을 줄여야 한다.



Figure 36 This is a slice grid formed at the height of 2m when we set the open delay to 13ms and the close delay to 8ms.

3. 결론

본 연구는 관람자에게 한층 더 선명한 3차원 물방울 조형 생성장치로 구현된 3차원 물방울 조형을 제공하기 위한 연구로, 기존의 국내외 2D, 3D 물방울 생성장치의 사용사례를 분석하였다. 기존에 사용하는 기법의 약점인 중력가속도에 의한 형상의 왜곡과 의도하지 않고 생성된 위성 물방울들로 인하여 해상도 저하되는 등, 현재까지 물방울 생성장치가 가지고 있는 대표적인 두 가지 문제를 해결했다. 다양한 실험을 통하여 통제 가능한 물방울 생성과 특정 구간에서의 왜곡이 없는 물방울 조형을 구현하기 위하여 연구했다. 단일 물방울 생성기법으로 특정 부피의 물방울을 생성하는데 필요한 시간을 측정하고 해당 물방울이 특정 위치에 낙하하는데 필요한 시간을 계산하였으며, 단일 물방울 생성기법으로 생성된 물방울을 이용하여 물방울의 낙하 거리를 제어하여 물방울 조형의 수직 방향 물방울들의 위치를 결정할 수 있다. 이것을 기초로 등 간격 기법과 최소 시간 간격 기법으로 특정 구간에서의 왜곡이 없는 물방울 조형을 구현하였다. 결과적으로 최소 시간 간격 기법은 등 간격 기법에 비해 조형의 해상도가 상당히 증가하는 점도 확인되었다. 이러한 연구의 결과는 향후 2D, 3D 물방울 생성장치의 형상 생성기법에 많은 변화를 가져다줄 것으로 예상된다.

감사의 글

본 논문의 일부분은 “한국콘텐츠진흥원 2016 문화기술 연구 지원사업”의 지원에 의하여 연구되었습니다.

References

- [1] Tao Jun, “The Design and Implementation of a Digitized Water Display System”, Master of Science in Mechanical Engineering, The Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [2] Peter C. Barnum, Srinivasa G. narasimhan, Takeo Kanade, “A Multi-Layered Display with Water Drops” SIGGRAPH ‘10 ACM SIGGRAPH 2010 papers Article No. 76, 2010.
- [3] B. J. Mason, W. Jayaratne and J. D. Woods, “An improved vibrating capillary device for producing uniform water droplets of 15 to 500µm radius”, SCI. Instrum, VOL. 40, 1963.
- [4] Prof. John W. M. Bush, “Interfacial Phenomena, Fall 2010”, MIT OCW, pp 40-44, June 3, 2013
- [5] Michael Vollmer and Klaus-Peter Möllmann, “Is There a Maximum Size of Water Drops in Nature?”, The Physics Teacher Vol. 51, October 2013.
- [6] Richard N. Berglund and Benjamin Y. H. Liu, “Generation of Monodisperse Aerosol Standards”, Sci. Technol, 1973, 7 (2), pp 147-153, February 1973.

〈 저 자 소 개 〉



임 용 춘

- 2007년 중국 연변대학교 미술대학 서양학과 학사
- 2009년 울산대학교 일반대학원 조소학과 석사
- 2018년 서강대학교 영상대학원 영상예술공학과 박사과정 수료
- 관심분야: 미디어 아트, 퍼지컬 미디어
- <https://orcid.org/0000-0003-2271-1877>



박 연 용

- 1992년 서울예술대학교 연극과 전문학사
- 2005년 Accademia di Belle Arti di Brera(Italia, Milano) Scenografia 학사
- 2015년 서강대학교 영상대학원 예술공학과 석사
- 2017년 서강대학교 영상대학원 영상예술공학과 박사과정 수료
- 관심분야: 무대공연, 홀로그램, 퍼지컬 미디어
- <https://orcid.org/0000-0001-6216-106X>



정 문 열

- 1980년 서울대학교 계산통계학과 학사
- 1982년 카이스트 계산통계학과 석사
- 1992년 Univ. of Pennsylvania 계산통계학과 박사
- 1992년 ~ 1994년 큐슈공과대학교 전자공학부 조교수
- 1994년 ~ 1999년 숭실대학교 컴퓨터공학부 부교수
- 1999년 ~ 현재 서강대학교 아트&테크놀로지학과/영상대학원 교수
- 관심분야: 퍼지컬 미디어, 두뇌동역학 모델링, 인공자연 예술
- <https://orcid.org/0000-0003-3809-1326>