



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

석사학위논문

인터페이스 DIMENSION을 이용한
인터랙티브 멀티미디어 작품 제작 연구

-멀티미디어 작품 <Tesseract>를 중심으로-

지도교수 김 준

동국대학교 영상대학원 멀티미디어학과

김 연 호

2025

석사학위논문

인터페이스 DIMENSION을 이용한
인터랙티브 멀티미디어 작품 제작 연구

-멀티미디어 작품 <Tesseract>를 중심으로-

김연호

지도교수 김준

이 논문을 석사학위 논문으로 제출함
2024년 12월

김연호의 음악석사(컴퓨터음악) 학위 논문을 인준함
2025년 1월

위원장 정진현

위원 김정호

위원 김준

동국대학교 영상대학원



목 차

I. 서론	1
1. 연구 목적 및 배경	1
II. 기술 연구	4
1. 인터페이스 제작 연구	4
1) 핸드 트래킹 기술 연구	6
① 핸드 트래킹 기기의 종류와 선택	6
② Leap Motion을 이용한 손의 동작 분석	9
2) 피에조 픽업 연구	10
① 픽업 분석 및 장착	11
② 피에조 픽업 신호 분석	13
3) LED와 아두이노 연구	14
① DIMENSION에 사용된 LED 연구	14
② 아두이노를 이용한 LED제어	17
2. 사운드 디자인 연구	19
1) 테이프음악 제작	20
2) DIMENSION의 실시간 사운드 프로세싱	22
① 오실레이터를 이용한 사운드 생성	22
② 딜레이 효과 연구	24
③ 코러스 효과 연구	27
④ 리버브 효과 연구	28
⑤ FFT 분석을 이용한 노이즈 게이트 연구	33
3. 손동작에 의한 사운드 인터랙션	35
1) 손동작과 음고 제어 인터랙션	35

2) 손동작과 디튠 제어 인터랙션	36
3) 손동작과 딜레이 효과 제어 인터랙션	38
4) 손동작과 리버브 효과 인터랙션	39
5) 손동작과 화음 인터랙션	41
4. 비주얼 디자인	42
1) 물리 엔진을 이용한 비주얼	42
2) 과형을 이용한 비주얼	46
3) 아나모픽 효과를 이용한 비주얼	51
III. 연구 기술의 작품 적용	52
1. 작품 소개	52
2. 작품 구성	53
1) 무대 구성	53
2) 음악 구성	55
3) 작품 구성 및 인터랙션 효과	57
① Intro파트	57
② A파트	57
③ B파트	58
④ C파트	60
⑤ D파트	61
IV. 결론	66
참 고 문 헌	68
Abstract	70
부록: 첨부 DVD	73

표 목 차

<표-1> 작품 파트별 타임라인과 BPM	55
------------------------------	----

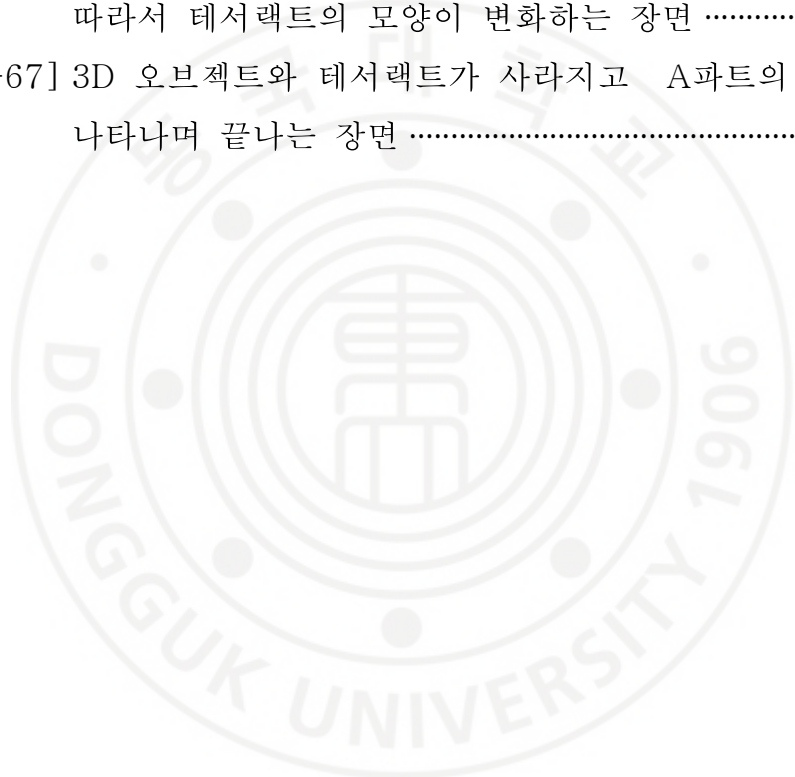
그 립 목 차

[그림-1] DIMENSION 3D모델 설계	5
[그림-2] 작품 퍼포먼스에서 초연된 DIMENSION의 완성된 모습 ..	5
[그림-3] Inside-out, Outside-in에 대한 설명	6
[그림-4] Leap Motion Controller 2	8
[그림-5] Ultraleap Gemini로 손의 동작을 트래킹하는 모습	9
[그림-6] TouchDesigner에서 핸드 트래킹 데이터를 추출하는 네트워크	9
[그림-7] 피에조 픽업	11
[그림-8] 목재 픽업 케이스와 케이스에 장착된 피에조 픽업의 모습	12
[그림-9] 고경도 EVA와 케이스에 장착된 피에조 픽업	12
[그림-10] 피에조 픽업의 신호를 처리하는 패치	14
[그림-11] 퍼포먼스에서 DIMENSION에 장착된 LED의 효과	15
[그림-12] WS2812B LED 외형	15
[그림-13] WS2812B의 데이터 시트	16
[그림-14] 장착된 LED의 위치와 빛 조사 각도	17
[그림-15] DIMENSION에 장착된 아두이노 우노 보드와 LED	17
[그림-16] 아두이노와 LED 연결 회로	18
[그림-17] TouchDesigner에서 LED제어 프로그래밍 구조	18

[그림-18] R, G, B 값을 시리얼 통신 하기 위한 TouchDesigner 네트워크	19
[그림-19] 테이프음악에 사용된 가상 악기들	21
[그림-20] 디튠된 오실레이터 수에 따른 주파수 스펙트럼의 차이 ..	22
[그림-21] 16개의 rect~로 오실레이터로 구성한 패치	23
[그림-22] detune 서브패치	24
[그림-23] 딜레이 효과 패치	25
[그림-24] 주파수 대역의 개별적인 딜레이 효과를 만드는 패치	26
[그림-25] spectral-delays 서브패치 내부의 az.spectdelay~ ..	27
[그림-26] 코러스 효과 패치	28
[그림-27] Raum의 native edit 뷰와 Max에서 vst로 불러온 모습(좌), RNBO Shimmer Reverb의 디자인 된 인터페이스 뷰와 패치(우)	29
[그림-28] RNBO Shimmer Reverb의 패치	30
[그림-29] p @title Reverb~ 패치	31
[그림-30] p @title Reverb~ 패치 내부의 신호 처리 패치들	32
[그림-31] 시간 기반 노이즈 게이트(A)와 주파수 기반 노이즈 게이 트(B)의 작동 방식	34
[그림-32] FFT 노이즈 게이트 작동 여부에 따른 주파수 스펙트럼 차이	34
[그림-33] 손의 거리 데이터를 음고로 변환하는 패치	36
[그림-34] 데이터 보간, 스케일링과 디튠 패치	37
[그림-35] 손을 쥐고 편 정도에 따른 데이터 값	38
[그림-36] 딜레이 효과 패치를 grab값으로 온·오프 제어하는 패치	39
[그림-37] 손의 회전 각도에 따른 데이터 값	40
[그림-38] 손의 회전 값에 따른 Raum 리버브 인터랙션 패치	40

[그림-39] 손의 회전에 따라서 화음이 추가되는 패치	41
[그림-40] Bullet Solver COMP의 파라미터 창	43
[그림-41] 3차원 공간에서의 2차원 시뮬레이션	43
Max OSC 송신 패치와 OSC 신호에 따라 공을 생성하는	
[그림-42] TouchDesigner 네트워크	44
[그림-43] Bullet Solver COMP와 그 내부의 3D 오브젝트와	
Actor COMP	45
[그림-44] 공의 포인트 감소를 위한 네트워크	45
[그림-45] 미디 데이터와 테이프음악의 동기화 예	46
[그림-46] 찰현 사운드의 음량 값을 OSC로 보내는 패치	47
[그림-47] TouchDesigner에서 OSC로 받은 음량 값을 처리하는	
패치	47
[그림-48] Pattern CHOP의 파라미터	48
[그림-49] 하늘색이 더해진 노이즈(좌), 일반 노이즈(우)	49
[그림-50] 하모닉스, 하모닉 스프레드, 지수에 따른 노이즈의 색	
변화	49
[그림-51] 주기에 따른 노이즈의 색 변화	50
[그림-52] 지수에 따른 노이즈의 선명도	50
[그림-53] 아나모픽 기법을 사용한 비주얼	51
[그림-54] 무대 사진	54
[그림-55] 라이브 퍼포먼스 시스템 구성도	55
[그림-56] Intro파트 비주얼의 진행	57
[그림-57] A파트 비주얼의 진행	58
[그림-58] B파트 비주얼의 진행	59
[그림-59] C파트 비주얼의 진행	60
[그림-60] D파트의 도입부	61

[그림-61] 공전하는 라이트로 인한 빛 반사의 변화	62
[그림-62] 형태가 바뀌는 3D 오브젝트, 간격이 멀어지는 면	62
[그림-63] 다포체의 형태를 갖추기 전 분리된 형태의 장면	63
[그림-64] 테서랙트(tesseract)가 완성되는 장면	63
[그림-65] 테서랙트가 연속으로 이어지는 장면	64
[그림-66] 3D 오브젝트가 테서랙트 내부로 진입하고, 테이프음악에 따라서 테서랙트의 모양이 변화하는 장면	64
[그림-67] 3D 오브젝트와 테서랙트가 사라지고 A파트의 공이 다시 나타나며 끝나는 장면	65



I. 서론

1. 연구 목적 및 배경

악기와 음악의 역사는 길다. 악기에 의해 음악이 변화하였고, 반대로 음악의 변화 때문에 악기의 모습이 변하기도 하였다. 디지털 시대가 도래하며 컴퓨터와 연결되는 방식의 다양한 형태의 악기들이 탄생하였고, 이는 인터페이스(interface)¹⁾의 역할을 한다. 단순히 소리가 발생하는 악기를 넘어서 컴퓨터와 연주자의 상호작용의 매개체로서 새로운 사운드, 새로운 음악을 창작하는 것에 큰 역할을 하고 있다. 본 연구자는 새로운 형태의 악기, 즉 인터페이스를 제작하여 작품을 연주하는 것을 통해서, 악기 연주 방식과 연주자의 감정 표현 방식의 확장 가능성에 대한 호기심을 가지고 출발했다.

여러 가지 악기들이 한데 모여 연주하는 오케스트라에서 연주자는 지휘자의 손동작을 보며 연주를 한다. 지휘자의 입장에서 보면 직접적으로 물리적인 행위를 하지는 않지만, 지휘를 통해서 수십 대의 악기를 연주한다. 본 연구자가 제작한 악기의 발상은 ‘오케스트라의 지휘자처럼, 손동작으로 악기를 연주할 수 있다면 어떨까?’라는 호기심에서 시작되었다. 같은 음악이라도 지휘자마다 그 곡에 대한 해석과 표현이 다르다. 지휘자는 물리적 접촉을 통해 악기를 직접 연주하지는 않지만, 음악의 흐름에 집중해서 전체를 이끌어가고, 음악이 표현되는 것에 깊게 관여한다. 이러한 지휘자의 역할에서 영감을 받아서, 전통적인 방식의 물리적 접촉을 통한 악기 연주가 아닌, 손동작으로 악기를 제어하는 시스템 제작했다. 이를 통해 연주 방식의 확장과, 연주자의 감정을

1) 사물 간 혹은 사물과 사람 간의 소통을 위한 매개체.

더 직관적이고 몰입감 있게 표현할 수 있는 가능성을 탐구하였다.

본 연구에서는 인공지능의 일종인 Computer Vision(CV)²⁾ 시스템 기반의 핸드 트래킹(hand tracking)³⁾을 사용하였다. 이는 시각적 정보를 컴퓨터에게 학습시켜, 객체를 인식 및 분류할 수 있도록 만든 것이다. 이것을 이용해서 물리적 접촉을 최소화하고, 손동작을 이용해서 악기의 음색이나 음고 등을 제어할 수 있는 악기를 제작하였다. 앞서 언급한 핸드 트래킹 기술은 음색, 음고 제어에만 적용이 되고, 해당 악기의 소리 자체를 발생시키는 것으로는 피에조 픽업(piezo pickup)⁴⁾을 사용하였다. 이는 악기 연주 시에 발생하는 소리를 수음하여 새로운 사운드로 구현하기 위한 수단이다. 추가로, 악기의 시각적 연출로는 아두이노(arduino)⁵⁾로 제어되는 LED를 사용하였다. 해당 악기의 모든 센서와 장치가 최종적으로는 컴퓨터에 연결되어서 사운드를 생성하고, LED가 제어되는 등의 작동을 한다.

작품 <Tesseract>는 4차원 시공간에 존재하는 인간에 대한 의문점으로 시작되었다. 인간은 4차원 시공간에 존재하는 3차원 존재이지만, 그 속에서 상호작용을 통해 지각하는 것은 2차원이다. 본 연구자는 이러한 모순적인 부분에서부터 미지의 4차원 시공간에 대한 호기심을 갖게 되었고, 영상을 이용하여 각 차원의 시각적인 형태를 표현하고, 시간 기반 예술인 음악을 이용하여 시간의 흐름을 표현하여 인지할 수 없는 4차원 시공간을 감각적으로 표현하기를 시도했다.

본 연구에서는 기존의 전통적인 방식의 악기와 다르게 물리적 접촉을 최소화한 방식으로 연주되는 악기를 제작하였다. 이를 통해서 작품

2) 컴퓨터 비전. 인공지능의 한 분야로 머신 러닝을 사용하여 이미지, 비디오 등 시각적 정보를 분석하는 것.

3) 모션 트래킹의 일종. 손의 움직임을 추적하기 위한 기술

4) 압전 효과에 발생된 전기를 이용하여 진동을 감지하는 변환기의 일종

5) 오픈 소스를 기반의 피지컬 컴퓨팅 플랫폼으로 마이크로컨트롤러 보드와 통합 개발 환경을 제공함.

<Tesseract>를 표현하고, 악기의 연주 방식의 확장과 연주자의 감정을 새롭게 표현하고 연구하는 것을 목적으로 한다.



II. 기술 연구

1. 인터페이스 제작 연구

본 작품에 사용된 인터페이스는 직접 제작하였으며, DIMENSION이라고 명명하였다. 핸드 트래킹을 통해 물리적 접촉을 최소화하여 연주자의 표현을 더 직관적으로 하고, 움직임의 자유로움을 더해 몰입하기 수월하도록 제작하였다. 핸드 트래킹 센서로 연주자의 손동작 데이터를 수집하고, 연주할 때 발생하는 진동을 피에조 픽업으로 수음하였다. 시각적 표현을 더하기 위해서 아두이노 기반의 LED를 이용하여 제작했다. 이 장치들은 Max6)와 TouchDesigner7)를 통해서 제어되고, 악기의 사운드와 비주얼이 인터랙션(interaction)8)한다.

작품의 컨셉인 4차원 시공간을 표현한 기하학적인 영상과 시각적인 조화를 이룰 수 있도록 삼각기둥 형태에서 아이디어를 얻어서 악기의 형태를 제작하였다. 각 기둥은 하나의 차원을 의미하게 되는데, 이 기둥들의 중심부에 장착된 핸드 트래킹 센서와 연주자의 손이 상호작용하는 것으로 차원 간의 전환을 상징한다. 핸드 트래킹 센서를 중심으로 120도 간격으로 현이 배치되었다. 연주되는 현의 시각적 강조를 위해 각 현을 향하는 LED를 장착하였다.

연주되는 방식에는 오른손으로 튕기는 발현(plucking)9), 활을 들고 켜는 활현(bowing)10)이 있다. 그리고 왼손의 움직임으로 센서와 상호

6) Cycling '74에서 개발한 비주얼 프로그래밍 언어

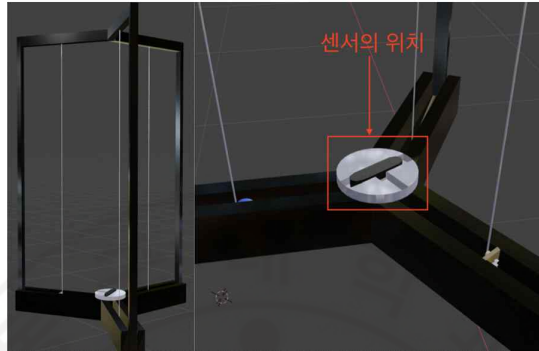
7) Derivative에서 개발한 노드 기반의 비주얼 프로그래밍 언어

8) 두 가지 이상의 주체가 상호작용하는 것

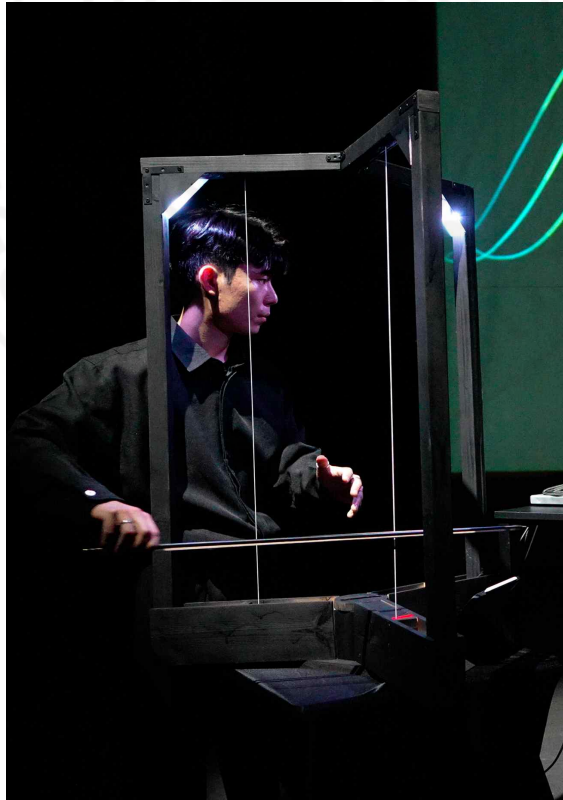
9) 튕기거나 뜯어서 소리를 내는 방식

10) 활로 켜서 소리를 내는 방식

작용하여 음고와 음색을 제어한다. [그림-1]은 DIMENSION의 설계 단계에서 3D 모델이고, [그림-2]는 실제 퍼포먼스에서 사용된 DIMENSION의 사진이다.



[그림-1] DIMENSION 3D모델 설계

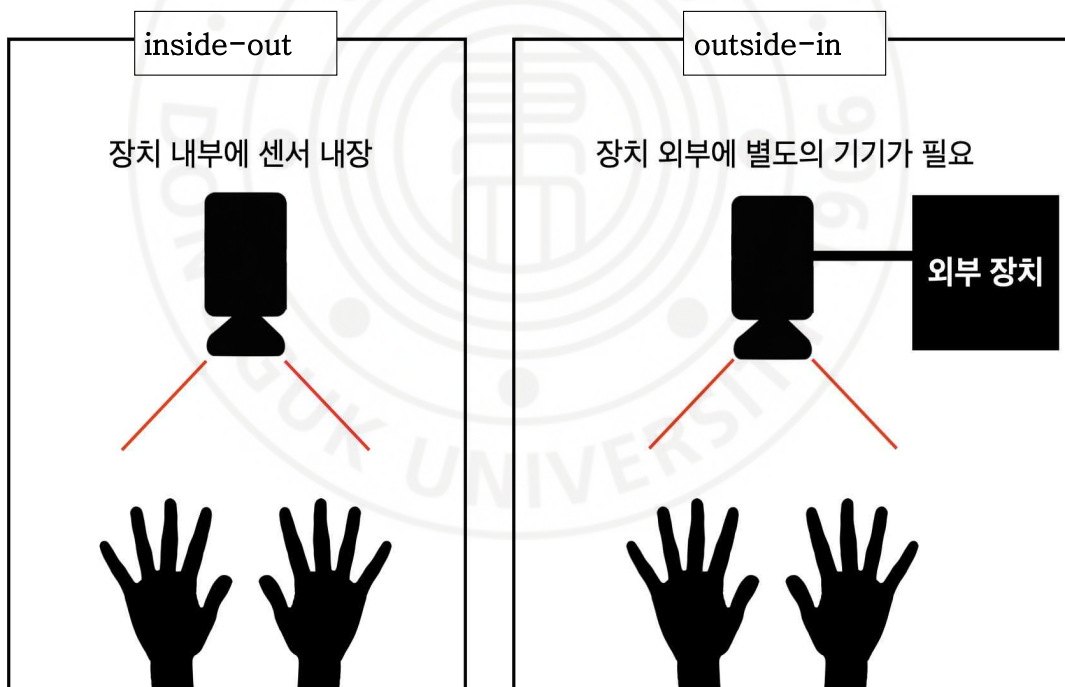


[그림-2] 작품 퍼포먼스에서 초연된 DIMENSION의 완성된 모습

1) 핸드 트래킹 기술 연구

① 핸드 트래킹 기기의 종류와 선택

핸드 트래킹(hand tracking)은 모션 트래킹의 한 분야이다. 게임, 교육, 미디어 산업 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 트래킹 센서의 위치에 따라서 inside-out, outside-in 방식으로 나뉜다. [그림-3] inside-out은 트래킹 장치에 센서 등 모든 필요 요소가 내장된 기기가 대상을 트래킹하는 방식이다. outside-in은 단일 기기가 아닌, 별도의 외부 기기를 결합하여 트래킹하는 방식을 말한다.



[그림-3] Inside-out, Outside-in에 대한 설명

센서의 종류로는 IMU¹¹⁾, Optical¹²⁾, Magnetic¹³⁾, LiDAR¹⁴⁾ 등이 있다. 추가로 Computer Vision(CV)이라는 시스템을 따로 분류하는데, 이것은 카메라를 사용하여 시각 데이터를 인공지능으로 처리하여 인식 및 추적하는 시스템이다. Computer Vision은 Inside-out이나 Outside-in 방식과 함께 사용될 때, 트래킹의 정확도를 증가시킨다.

inside-out 방식은 센서가 장치 내부에 존재하고 외부 환경을 감지하고 추적하는 방식이다. 장치 자체에 트래킹 센서가 포함된 구조로, 이동이 편리하다. 하지만 사용 환경의 조도, 과도한 빛의 반사 등으로 센서의 정확도가 떨어질 수 있다. 대표적인 센서로 Oculus Quest 3¹⁵⁾, Wii¹⁶⁾, Apple Vision Pro¹⁷⁾, Leap Motion Controller 2(이하 Leap Motion)¹⁸⁾가 있다.

outside-in 방식은 외부에 설치된 센서가 대상의 움직임을 감지하고 추적하는 방식이다. 고정된 환경에 설치되어 특정 공간 내에서 움직임을 정확하게 식별할 수 있다. 다만, 트래킹 센서가 외부 장치에 의존하므로 한정된 공간에서만 운용이 가능하다. 대표적인 센서로는 Azure Kinect DK¹⁹⁾, Oculus Rift CV 1²⁰⁾가 있다.

Computer Vision(CV)은 Inside-out, Outside-in과 같은 트래킹 개념이 아닌, 하나의 시스템이다. 다량의 데이터 학습을 통해서 인공 신경망(artificial neural network)을 연속적으로 축적하는 딥 러닝(deep

11) Inertial Measurement Unit의 줄임말. 관성 측정 장치. 가속도, 방향, 각속도를 측정하는 기술

12) 광학식 핸드 트래킹

13) 자기장을 이용하여 추적하는 방식

14) 레이저를 사용하여 깊이 정보를 측정하는 기술

15) META의 자회사 Reality Labs에서 개발한 VR헤드셋 기기

16) 닌텐도에서 개발한 Wii 콘솔 컨트롤러

17) Apple에서 개발한 공간 컴퓨터(Spatial Computer) 기기

18) Leap Motion에서 개발한 핸드 트래킹 기기

19) Microsoft에서 개발한 핸드 트래킹 기기

20) Meta에서 개발한 핸드 트래킹 기기.

learning)으로 더욱 정확한 트래킹이 가능하다.

본 연구에서는 inside-out 방식이며 핸드 트래킹에 특화된 Leap Motion 기기를 사용하였다. 이는 광학식 트래킹 센서로, 두 개의 IR 카메라와 적외선 LED를 사용하여 대상을 감지한다. 최소 약 10cm부터 최대 110cm 거리와 상하, 좌우 160도의 감지 시야각을 가진다. [그림-4]는 Leap Motion의 작동 상태에서 전면부의 모습이다.



[그림-4] Leap Motion Controller 2

Leap Motion을 구동하는 소프트웨어인 Ultraleap Gemini는 Mac OS, Windows OS, Linux, Raspberry Pi 등 다양한 환경에서 실행이 가능하다. 본 연구는 Mac OS에서 진행하였다. [그림-5]은 Mac OS에서 Ultraleap Gemini 소프트웨어를 구동하여 손의 동작을 트래킹하는 모습이다. 첫 번째로 인식된 손은 0번 인덱스를 부여한다. 두 번째 손은 1번 인덱스를 부여한다. 손이 트래킹 범위를 벗어났다가 다시 인식되면 새로운 객체로 인식하여 새로운 ID를 부여하고, 손의 스켈레톤을 구성하는 원의 색이 바뀐다.



[그림-5] Ultraleap Gemini로 손의 동작을 트래킹하는 모습

② Leap Motion을 이용한 손의 동작 분석

TouchDesigner를 사용하여 손의 동작을 트래킹한 데이터를 추출하고 Max를 이용하여 프로그래밍했다. [그림-6]은 TouchDesigner에서 0번 인덱스 손의 거리(palm ty²¹), 그랩(grab)²², 손의 회전(palm rz²³) 상태에 대한 분석 정보를 추출하고 OSC²⁴를 사용해서 Max로 전송하는 네트워크의 모습이다. Leapmotion CHOP²⁵에서 Ultraleap Gemini를 구동하여 데이터를 분석한다. Select CHOP은 본 연구에서 필요했던 정보만 선택하고, 식별하기 수월 하도록 이름을 변경해 주었다. Merge CHOP으로 여러 개의 정보를 하나로 취합하여 OSC out CHOP을 통해 Max로 전송한다.



[그림-6] TouchDesigner에서 핸드 트래킹 데이터를 추출하는 네트워크

TouchDesigner의 OSC Out CHOP을 통해서 Max로 전송된 데이터는 보간(interpolation), 필터링(filtering), 스케일링(scaling)을 거쳐서 악기의 음색과 비주얼의 제어에 사용된다. 이에 대한 자세한 설명은 3장에 서술하기로 한다.

2) 피에조 픽업 연구

DIMENSION을 연주할 때 발생하는 소리를 수음하여 새로운 사운드로 만들기 위해서 피에조 픽업²⁶⁾을 사용하여 현(stirng)의 진동을 수음하였고, 이를 amplitude envelope²⁷⁾으로 적용하였다. 악기에 사용된 현은 DR Strings²⁸⁾의 Neon White²⁹⁾ 일렉트릭 베이스 현을 사용하였다. 해당 현이 백색 네온 코딩이 되어있기 때문에 LED 조명에 비추어질 시에, 일반 베이스 현에 비해서 시인성이 좋다. 또한 백색이기 때문에 의도하지 않은 색으로 작품 표현 의도를 해치지 않기 때문에 선택하였다.

21) Translate Y. Y축 위치. Leap Motion과 손바닥의 거리를 나타냄

22) 손을 쥐고핀 상태

23) Rotate Z. Z축 회전. 손바닥의 Z축 기준 회전 각도를 나타냄

24) Open Sound Control의 줄임말. 네트워크를 통해 멀티미디어 장치간 실시간 통신을 가능하게 하는 프로토콜

25) Channel Operator의 줄임말

26) 압전 소자를 이용한 트랜스듀서의 일종

27) 소리의 진폭을 시간축에 따라서 나타내는 곡선

28) 미국의 악기 악세사리 제작 회사

29) 네온 코딩 조명 장치에 의해 발광하여 시인성을 높인 현.

① 픽업 분석 및 장착

픽업은 악기의 물리적 진동을 포착하여 전기신호로 변환 해주는 장치이며, 주로 일렉트릭 기타에 주로 사용되는 마그네틱 픽업(magnetic pickup)과 현악기, 어쿠스틱 기타 등에 사용되는 피에조 픽업이 있다. 본 연구에서는 구조가 비교적 간단하고 주변의 자기장이나 다른 전자 기기에 영향을 미치지 않는 피에조 픽업을 사용하였다. [그림-7]



[그림-7] 피에조 픽업

피에조 픽업의 금속 재질의 압전 소자는 전도성 물체가 접촉 시 저항의 변화로 출력 신호의 오류가 발생한다. 또한 물리적 충격에 파손이 되기도 쉬운 문제가 있어서, 목재로 케이스를 제작하여 문제를 해결하였다. [그림-8]의 왼쪽은 케이스의 모습, 오른쪽은 케이스에 피에조 픽업을 장착한 모습이다.



피에조 픽업용 목재 케이스

목재 케이스에 장착된 피에조 픽업

[그림-8] 목재 픽업 케이스와 케이스에 장착된 피에조 픽업의 모습

피에조 픽업의 목재 케이스와 현 사이에 고경도 EVA를 부착하여, 현의 진동하는 시간을 단축하여 보다 빠르게 소멸하도록 하였다. 이것은 DIMENSION의 발현 사운드의 제작을 위해 필수로 행해져야 하는 과정이었다. 또한 악기에 장착된 현이 직접 닿은 상태로 진동할 시 발생할 수 있는 버징(buzzing)³⁰⁾ 이나, 의도하지 않은 접촉 노이즈를 방지하는 효과도 있다. [그림-9]



고경도 EVA

고경도 EVA와 케이스에 장착된 피에조 픽업

측면에서 본 고경도 EVA와 케이스에 장착된 피에조 픽업

[그림-9] 고경도 EVA와 케이스에 장착된 피에조 픽업

30) 현과 악기의 다른 부분이 진동으로 마찰하며 발생하는 소음

② 피에조 픽업 신호 분석

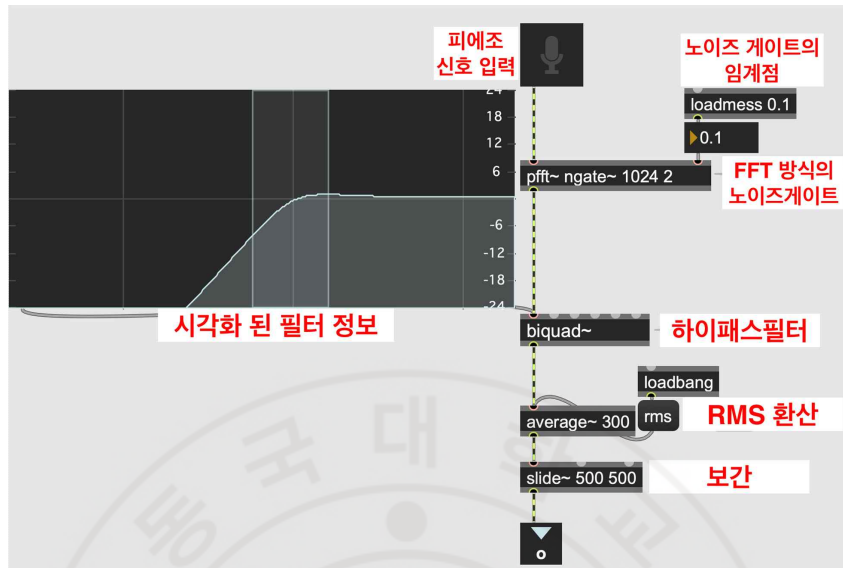
DIMENSION의 연주로부터 피에조 픽업을 통해 들어온 신호를 Max에서 노이즈 게이트(noise gate)³¹⁾와 하이패스필터(high pass filter)³²⁾, RMS³³⁾ 환산, 보간을 거쳐서 악기에서 발생하는 소리의 amplitude envelope으로 적용된다. 노이즈 게이트와 하이패스필터를 거침으로써 연주자가 의도하지 않은 소리가 발생하는 것을 방지하고, RMS환산 및 보간을 거침으로써 급격한 신호 변화로 인한 노이즈성 사운드의 출력을 방지하게 된다.

[그림-10]의 pfft~ negate~오브젝트를 통해서 amplitude값 0.1을 초과하는 소리만 통과시킨다. biquad~오브젝트는 하이패스필터로 저음역에서 발생하는 불필요한 진동을 걸러낸다. average~오브젝트는 피에조 픽업으로 들어온 신호를 300ms RMS 신호로 치환해 준다. slide~오브젝트는 값이 상승할 때와 하강할 때 급격한 변화를 완화한다.

31) 노이즈 게이트. 일정 수준 이하의 작은 신호를 차단하는 시그널 프로세서의 일종

32) 음성 신호의 고음역대를 통과시키는 필터

33) Root Mean Square의 줄임말. 일정 시간 내에 신호 값의 평균



[그림-10] 피에조 픽업의 신호를 처리하는 패치

3) LED와 아두이노 연구

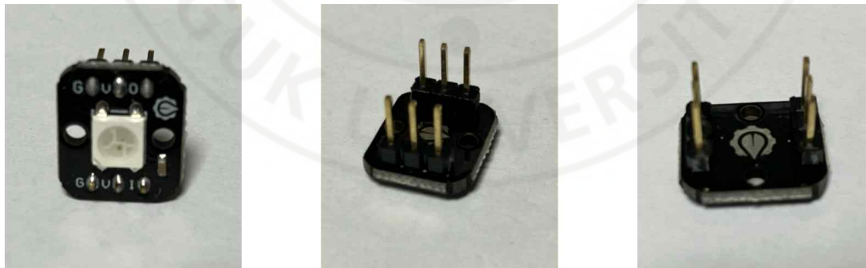
① DIMENSION에 사용된 LED 연구

작품과 작품 영상의 흐름에 따른 감정 표현을 위하여 RGB LED를 사용하였다. DIMENSION에 장착된 현의 시인성을 높여서 연주의 용이함과 관객의 몰입감을 돕는다. [그림-11] 은 실제 퍼포먼스에서 악기에 장착된 LED에 의해 악기의 현과 연주자의 손이 부각되는 모습이다.



[그림-11] 퍼포먼스에서 DIMENSION에 장착된 LED의 효과

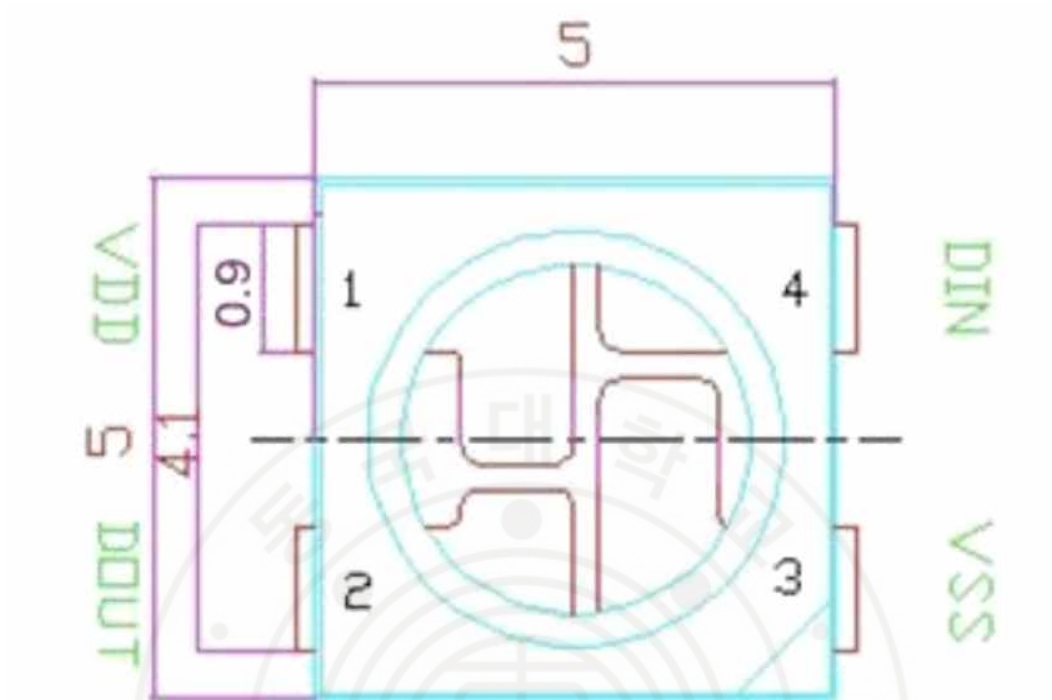
DIMENSION에 장착된 WS2812B LED³⁴⁾는 5V 전압 환경에서 하나의 LED셀이 약60mA의 전류를 필요로 한다. DIMENSION에 사용된 LED의 수는 3개로, 아두이노 우노 보드³⁵⁾에서 공급하는 양으로 충분하여, 별도의 전원을 공급하지 않았다. [그림-12]



[그림-12] WS2812B LED 외형

34) WorldSemi에서 제작한 RGB LED칩

35) 아두이노 개발 환경에서 사용할 수 있는 보드 중 한 가지.

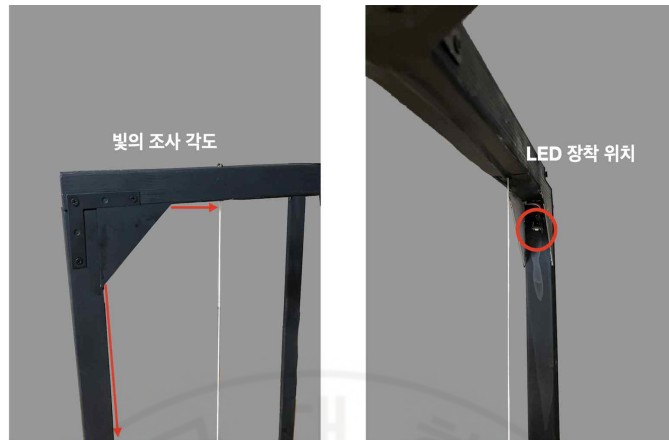


[그림-13] WS2812B의 데이터 시트

[그림-13]³⁶⁾은 WS2812B LED의 데이터 시트이다. 그림상의 VDD로 5V 전원이 공급된다. DIN은 아두이노 보드의 디지털 입출력에 연결되어 제어 신호를 받는다. VSS는 아두이노 보드의 그라운드에 연결된다. DOUT은 후속 LED로 제어 신호를 연결하기 위한 부분이다.

LED의 장착 위치는 DIMENSION의 세 개의 기둥 모서리 안쪽이다. 현을 향하는 빛 이외는 차단하기 위하여 LED의 양쪽에 검정색 마분지를 부착하였다. [그림-14]는 LED의 장착 위치와 빛 조사 각도를 보여주는 그림이다.

36) www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1179113/WORLDSEMI/WS2812B.html



[그림-14] 장착된 LED의 위치와 빛 조사 각도

② 아두이노를 이용한 LED제어

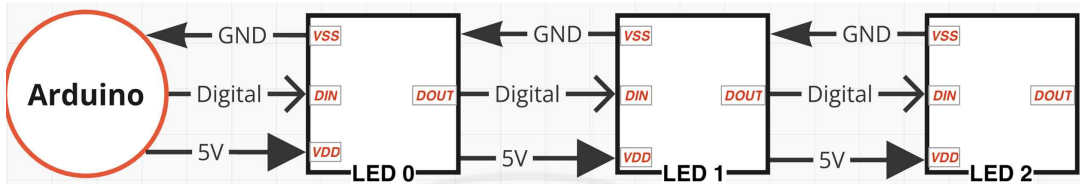
Arduino IDE³⁷⁾는 아두이노 우노 보드 프로그래밍을 위한 통합 개발 환경으로, 이를 이용하여 LED를 제어하였다. USB 케이블을 사용하여 컴퓨터와 연결되고 프로그래밍 데이터를 수신한다.



[그림-15] DIMENSION에 장착된 아두이노 우노 보드와 LED

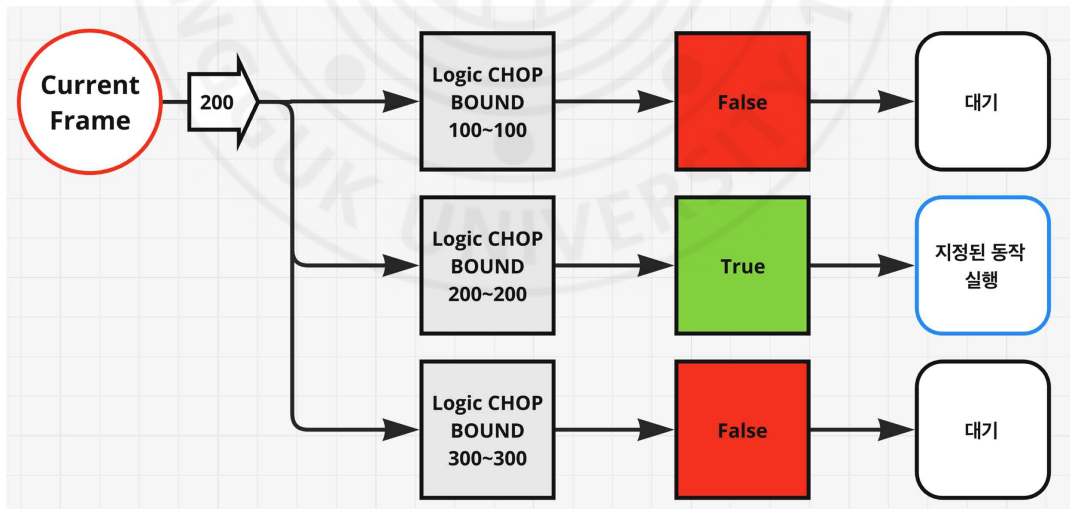
37) 아두이노 통합개발환경(Integrated Development Environment)으로의 줄임말로 편집기, 컴파일러, 업로더 등이 합쳐진 소프트웨어 환경이다. 여러 가지 개발에 필요한 라이브러리가 있으며, 실시간 모니터링을 위한 시리얼 모니터가 있다.

DIMENSION에 장착된 세 개의 LED는 [그림-16]과 같이 직렬로 연결되었다. 첫 번째 LED와 아두이노 보드가 연결되고, 후속으로 연결되는 LED는 각각 같은 입력 신호를 받도록 연결된다.



[그림-16] 아두이노와 LED 연결 회로

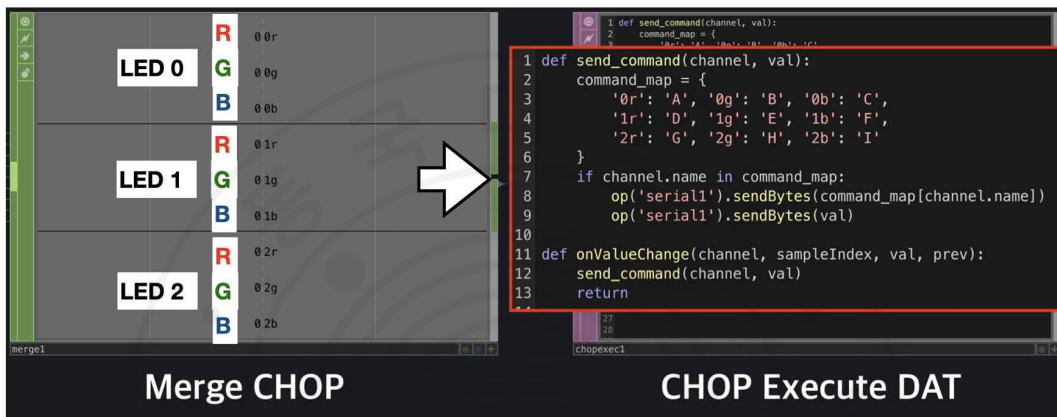
LED의 제어는 TouchDesigner를 사용하여 자동화하였다. 작품이 일정 시간 진행되면 TouchDesigner에서 아두이노로 신호를 전송하는 것으로 LED의 색과 밝기를 제어하였다. [그림-17]은 TouchDesigner에서 현재 프레임(frame)³⁸⁾ 값을 제어 트리거로 사용하는 구조에 대한 그림이다. Logic CHOP의 조건에 따라서, 특정 프레임에 도달하면 LED를 제어하는 명령을 출력한다.



[그림-17] TouchDesigner에서 LED제어 프로그래밍 구조

38) 이미지를 세는 단위.

TouchDesigner에서 세 개의 LED의 R, G, B 값을 제어하는 데이터를 Merge CHOP으로 모은 뒤 CHOP Execute DAT을 통해서 Arduino와 시리얼(serial)³⁹⁾ 통신을 한다. 송신 과정에서 R, G, B값은 알파벳 순서로 인덱스를 부여하여, 지정된 LED의 R, G, B값을 제어하게 된다. [그림-18]



[그림-18] R, G, B 값을 시리얼 통신 하기 위한 TouchDesigner 네트워크

2. 사운드 디자인 연구

작품 Tesseract는 테이프음악(tape-music)⁴⁰⁾을 통해 재생되는 부분과 DIMENSION을 통해서 연주되는 부분으로 나누어진다. 악기 DIMENSION은 현이 장착되어 발현, 찰현을 통해 연주된다. 연주를 통해 발생한 소리는 피에조 픽업을 통해서 수음 되고, Max를 거쳐서 DIMENSION의 최종 출력 사운드로 재 탄생한다. 따라서 연주하는 행위와 사운드의 시청각적 일치를 위해서 사운드 또한 발현, 찰현 악기

39) 직렬로 정보를 전달하는 통신 방식

40) 전자적으로 생성하거나 녹음된 소리를 녹음 매체에 편집, 조합 등을 거쳐 재생을 목적으로 만든 형태의 전자음악을 의미.

와 걸맞게 특징을 살려 제작하였다. 발현 사운드는 지속 시간이 짧게 설계하여 튕기는 사운드에 걸맞게 제작하였고, 발현 사운드는 활으로 현을 켜는 동안만 지속적으로 사운드가 유지되도록 하였다. 그리고 풍성한 현악기의 사운드를 표현하고자 톱니파형을 사용하여 제작했다.

1) 테이프음악 제작

테이프음악의 제작은 Logic Pro⁴¹⁾에서 이루어졌으며, 사용된 가상 악기로는 Serum⁴²⁾, ES2⁴³⁾, Alchemy⁴⁴⁾, Sculpture⁴⁵⁾, Sampler⁴⁶⁾ 등이 있다. Serum, ES2, Alchemy는 가산 합성(additive synthesis)⁴⁷⁾, 감산 합성(subtractive synthesis)⁴⁸⁾, 주파수 변조 합성(frequency modulation synthesis)⁴⁹⁾, 진폭 변조 합성(amplitude modulation synthesis)⁵⁰⁾ 등의 합성 방식을 사용할 수 있는 신디사이저 (synthesizer)이다. Sculpture는 피지컬 모델링 합성(physical modeling synthesis) 방식의 신디사이저로, 이는 공학적 방식으로 악기 소리의 특성을 재현하는 방식을 의미한다. Sampler는 샘플링(sampling)에 이용되는 악기이다. 샘플링이란 기존의 음원을 새롭게 가공하여 배치하는 행위를 말하는데, Sampler는 미디⁵¹⁾ 신호를 사용하여 샘플

41) Apple의 Digital Audio Workstation

42) Xfer Records의 소프트웨어 신디사이저

43) Logic Pro에 내장된 소프트웨어 신디사이저.

44) Logic Pro에 내장된 웨이브 테이블 방식의 소프트웨어 신디사이저.

45) Logic Pro에 내장된 Physical Modeling 신디사이저

46) Logic Pro에 내장된 샘플러

47) 사인파(sine wave)를 여러개를 더하여 사운드를 합성하는 방식

48) 이미 배음을 가진 파형을 필터링하여 제거하여 사운드를 합성하는 방식

49) 캐리어 오실레이터를 모듈레이터 오실레이터로 주파수를 변조시켜 배음을 생성하여 사운드 합성하는 방식

50) 캐리어 오실레이터를 모듈레이터 오실레이터로 진폭을 변조시켜 배음을 생성하여 사운드를 합성하는 방식

플링의 과정을 축소하여 편의성을 더한 악기이다.



[그림-19] 테이프음악에 사용된 가상 악기들

사운드 효과로는 Logic Pro에 내장된 이퀄라이저(equalizer)⁵², 컴프레서(compressor)⁵³, 비트 크러셔(bit crusher)⁵⁴, 딜레이(delay)⁵⁵, 리버브(reverb)⁵⁶ 등의 소프트웨어 이펙터들을 사용하였다.

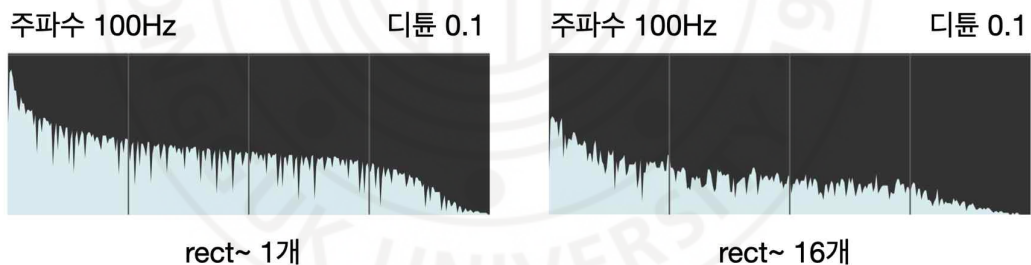
51) Musical Instrument Digital Interface의 줄임말. 악기 간의 데이터 통신 규격
 52) 음성 신호의 주파수 특성을 조절하는 이펙터
 53) 음성 신호의 다이내믹 레인지를 조절하는 이펙터
 54) 음성 신호의 해상도를 저하시키는 이펙터
 55) 음성 신호를 저장 매체에 기록 후 지연시켜 재생하여 에코와 유사한 효과를 만드는 이펙터
 56) Reverbration의 줄임말. 잔향 효과

2) DIMENSION의 실시간 사운드 프로세싱

DIMENSION의 사운드는 실시간 사운드 프로세싱(real-time sound processing)을 통해서 생성되었다.

① 오실레이터를 이용한 사운드 생성

DIMENSION의 발현 사운드 제작을 위해서 Max의 rect~오브젝트를 오실레이터로 사용해서 사각파(square wave)를 발생시켰다. 16개의 rect~는 detune 서브패치⁵⁷⁾를 통해서 각각의 주파수에 오차가 생긴다. 하나의 오실레이터를 사용하는 것에 비하여 여러 개의 오실레이터를 디튠(detune)⁵⁸⁾하여 사용하면, 여러 명이 연주하는 듯한 코러스 효과가 발생하여 사운드가 풍성해진다. [그림-20]



[그림-20] 디튠된 오실레이터 수에 따른 주파수 스펙트럼의 차이

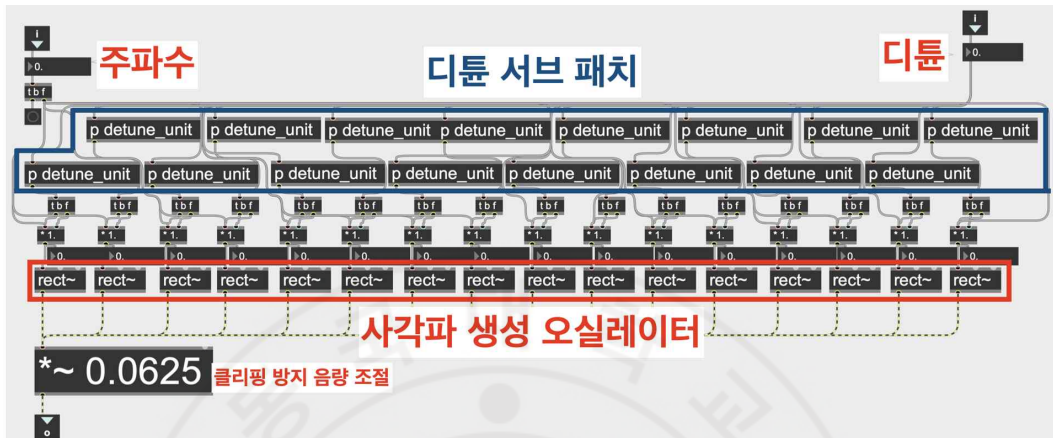
[그림-21]은 16개의 rect~ 오실레이터로 구성된 패치이다. 좌측 인렛(in-let)⁵⁹⁾으로는 주파수 값이 들어온다. 우측 인렛으로는 디튠 정도를 결

57) Max에서 메인 패치 내부에 포함된 독립적인 패치, 객체 모듈화와 가독성을 높이는데 사용됨

58) 2개 이상의 오실레이터를 사용할 때, 서로 미세한 차이가 발생하도록 주파수를 조작하는 것

59) Max의 오브젝트에서 신호를 받는 부분. 좌측부터 오른쪽순으로 숫자를 부여함.

정하는 변수가 들어온다. 음량 값 1을 초과하여 클리핑(clipping)⁶⁰⁾ 되는 것을 방지하기 위해서 최종 출력 전에 0.0625를 곱하였다.



[그림-21] 16개의 rect~로 오실레이터로 구성된 패치

[그림-22]는 detune 서브패치이다. 인렛으로 디튤량을 결정하는 변수 값을 받는다. random오브젝트에서 0부터 1000000까지의 숫자를 무작위로 출력하면, scale오브젝트에서 -1부터 1으로 스케일링한다. 이렇게 처리된 무작위 숫자는 디튤 변수에 곱해진다. 본 값은 pow오브젝트의 두 번째 인렛으로 들어가서 2의 지수로 계산된다. 이렇게 출력된 값은 아웃렛(out-let)으로 나가서 rect~의 주파수 값에 곱해져서 디튤 효과를 만들어낸다.

악기의 찰현 사운드를 만드는 것에는 saw~오브젝트가 사용되었으며, 방식은 앞서 서술한 rect~를 이용한 방식과 같다. saw~는 톱니파(sawtooth wave)를 발생시킨다. 이는 [그림-21]의 패치와 똑같은 구조에 rect~대신 saw~로 대체한 패치이므로 별도의 그림은 생략한다.

60) 음성 신호가 임계값을 초과하여 왜곡이 발생하는 것.



[그림-22] detune 서브패치

② 딜레이 효과 연구

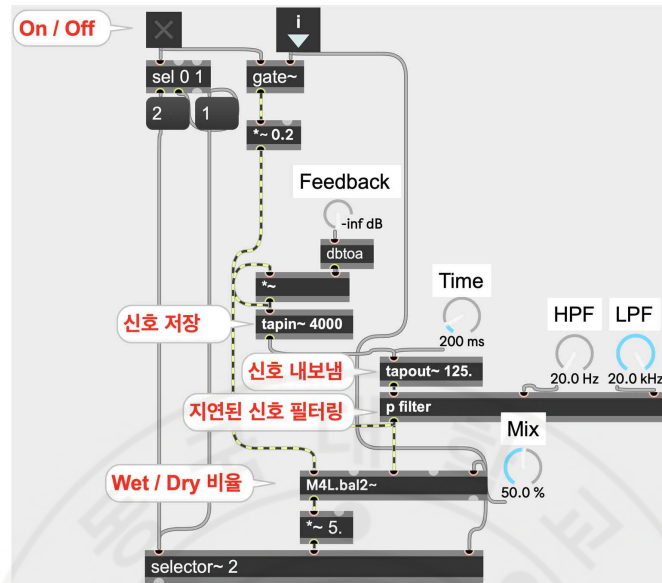
딜레이 효과(delay effect)는 time-based⁶¹⁾ 효과의 일종이다. 신호를 복제 및 지연시켜서 메아리치는 효과를 만들어낸다. 지연되는 시간에 따라 더블링(doubling)⁶²⁾ 효과, 슬랩백(slapback) 효과⁶³⁾, 에코(echo) 효과⁶⁴⁾ 등 부차적인 이름을 붙이기도 한다. 일반적으로 사용되는 딜레이는 tapin~오브젝트와 tapout~오브젝트로 만들어진다.

61) 시간 기반 효과. 신호 처리를 시간의 흐름에 연계하여 변형하는 것

62) 신호를 약 20ms 이내로 지연시켜 사운드의 두께감을 더하는 기법

63) 신호 지연을 약 50~250ms 범위로 설정하여, 원본과 분리되어 들리지만 한번만 반복하도록 설정하여 사운드를 연출하는 기법

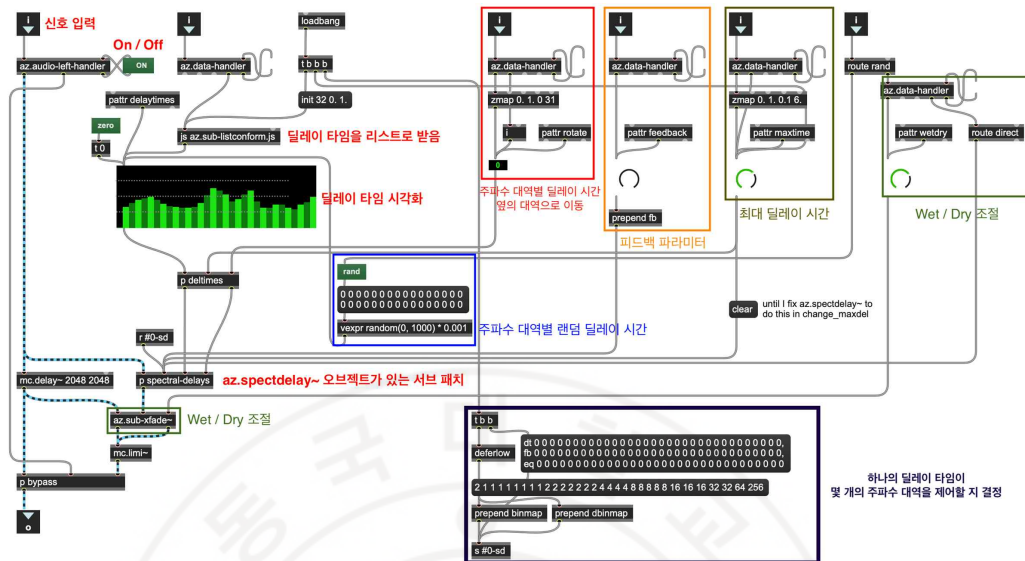
64) 250ms이상의 지연 시간과 피드백을 이용해서 지속적으로 반사되는 공간감을 연출하는 것



[그림-23] 딜레이 효과 패치

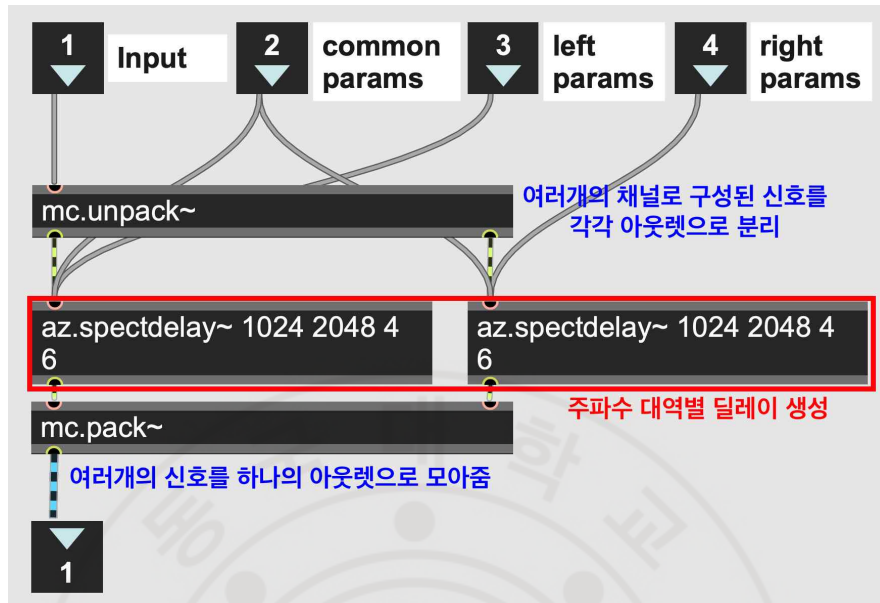
[그림-23]의 tapin~은 버퍼(buffer)라고 불리는 일종의 저장공간이다. 버퍼는 입력되는 신호를 지속적으로 갱신하는 특징을 가진다. tapout~은 tapin~에 저장된 신호를 정해진 지연 시간에 맞추어 출력한다. *~ 오브젝트는 tapout~에서 출력된 신호에 Feedback 파라미터 변수 값을 곱하여 다시 tapin~으로 입력시켜서 순환되는 구조를 만든다. Feedback이 1이면 신호가 무한하게 반복되는 셀프 오실레이션(self oscillation) 현상이 일어난다. 이는 통상적으로 피해야 할 현상으로 치부되지만, 경우에 따라서 음악적 용도로 사용되기도 한다. p filter 서브패치에서는 tapout~에서 출력되는 신호에 필터링을 적용하여 음색의 변화를 주는 기능을 한다. 추가로, FFT⁶⁵⁾를 이용하여 주파수 대역의 개별적인 딜레이 효과를 부여하는 az.specrdelay~ 오브젝트를 이용한 딜레이 효과를 사용하였다.

65) Fast Fourier Transform의 줄임말. 시간 기반 음성 신호를 주파수 기반의 스펙트럼 데이터로 변환하는 알고리즘



[그림-24] 주파수 대역의 개별적인 딜레이 효과를 만드는 패치

[그림-24]의 패치는 `az.spectdelay~`의 작동을 위해서 필요한 각종 파라미터 값을 정렬하여 입력시키기 위한 패치이다. 이 오브젝트는 32개의 밴드를 딜레이 효과로 사용할 수 있고, 이퀄라이저로도 사용이 가능하다. 딜레이로 사용할 경우에는 일반적인 딜레이 효과와 같이 지연 시간, 피드백의 양 등의 조절이 가능하다. 해당 패치에는 `spectral-delays`라는 서브패치가 포함되어 있는데, 그 내부 [그림-25]에는 앞서 언급한 `az.spectdelay~`가 있다.

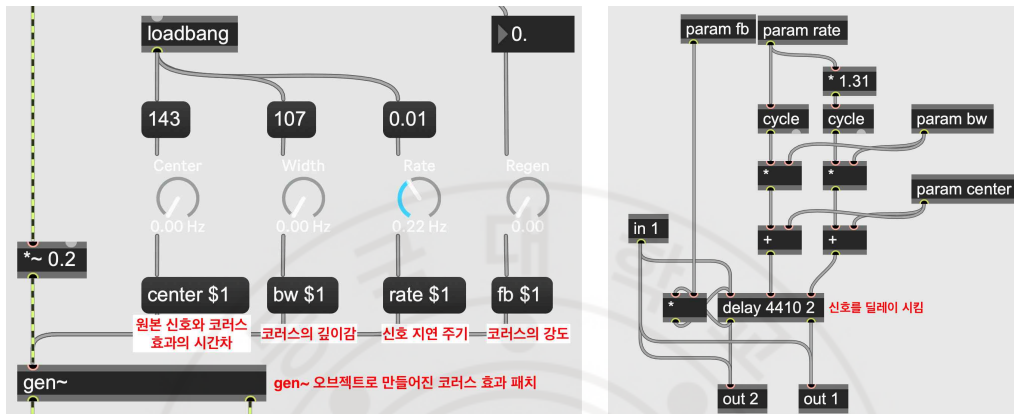


[그림-25] spectral-delays 서브패치 내부의 az.spectdelay~

③ 코러스 효과 연구

코러스 효과(chorus effect)는 time-based 효과의 일종이다. 음성 신호를 복제하고 미세하게 음고를 변화시킨 뒤, 재생 시간의 오차를 발생시킨다. 이후 원본 신호와 융합시키면 여러 개의 소리가 동시에 연주되는, 합창을 하는 것과 같은 효과를 낸다. [그림-26]의 좌측은 코러스 효과의 파라미터 제어를 위한 패치이고, 우측은 gen~오브젝트를 이용하여 코러스 효과를 만들어내는 패치이다. 우측 패치의 param오브젝트는 좌측 패치의 파라미터 값을 받아오는 역할을 한다. cycle오브젝트를 이용하여 in1오브젝트로 들어오는 입력 신호의 지연을 주기적으로 변형한다. 이때 주기를 제어하는 것은 param rate값이다. cycle의 값에 param bw값을 곱하는 것으로 깊이(depth)를 조절하고, param center 더하는 것으로 원본 신호와 코러스 신호의 시간 차를 조절한다. param fb은 코러스 효과의 강도를 제어한다. 일반적으로 딜레이 효과의 개념

에서는 딜레이 신호의 지속되는 시간을 의미하지만, 코러스에서는 효과의 중첩의 개념에 가깝기 때문에 강도라고 표현하였다.

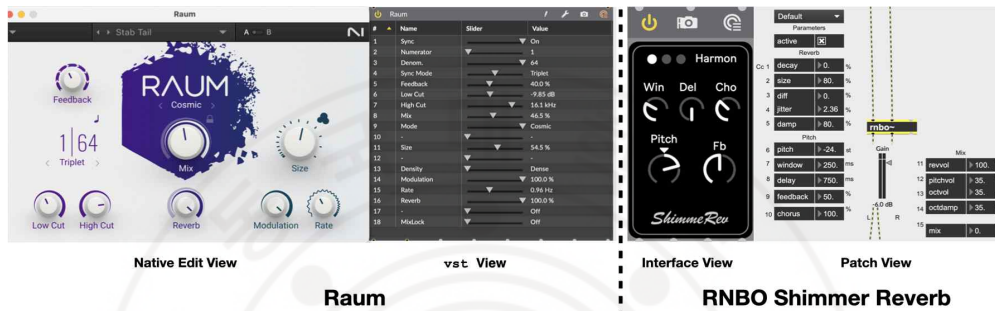


[그림-26] 코러스 효과 패치

④ 리버브 효과 연구

리버브 효과(reverb effect)는 물리적인 공간에서 발생한 음파가 표면에 충돌하여 반사, 흡수되며 생성하는 잔향 특성이다. 리버브 효과를 생성하는 방법에는 네 가지가 있다. 첫째, 자연 리버브는 잔향이 있는 물리적 공간에서 음원을 녹음하여 자연 리버브를 얻어내는 것이다. 둘째, 메카니컬 리버브(mechanical reverb)는 금속판(plate)이나 용수철(spring)에 음원을 인위적으로 충돌시켜 발생하는 진동에 의한 울림 효과를 재녹음하여 리버브를 효과 연출하는 것이다. 셋째, 컨볼루션 리버브(convolution reverb)는 실제 공간에서 측정된 임펄스 응답(impulse response)를 기반으로 해당 공간의 잔향을 재현하여 만드는 것이다. 마지막으로, 알고리즘 리버브(algorithm reverb)는 공학적인 계산 방법을 통해 잔향을 만들어내는 방식이다.

본 연구에서는 알고리즘 리버브인 Native Instruments⁶⁶⁾의 Raum과, 알고리즘 리버브에 쉬머(shimmer)⁶⁷⁾ 효과를 추가한 RNBO Shimmer Reverb⁶⁸⁾를 사용하였다. [그림-27]은 Raum의 native edit 뷰(view)와 max에서 vst오브젝트로 불러온 형태와 RNBO Shimmer Reverb의 디자인된 인터페이스 뷰와 패치의 모습이다.



[그림-27] Raum의 native edit 뷰와 Max에서 vst로 불러온 모습(좌), RNBO Shimmer Reverb의 디자인 된 인터페이스 뷰와 패치(우)

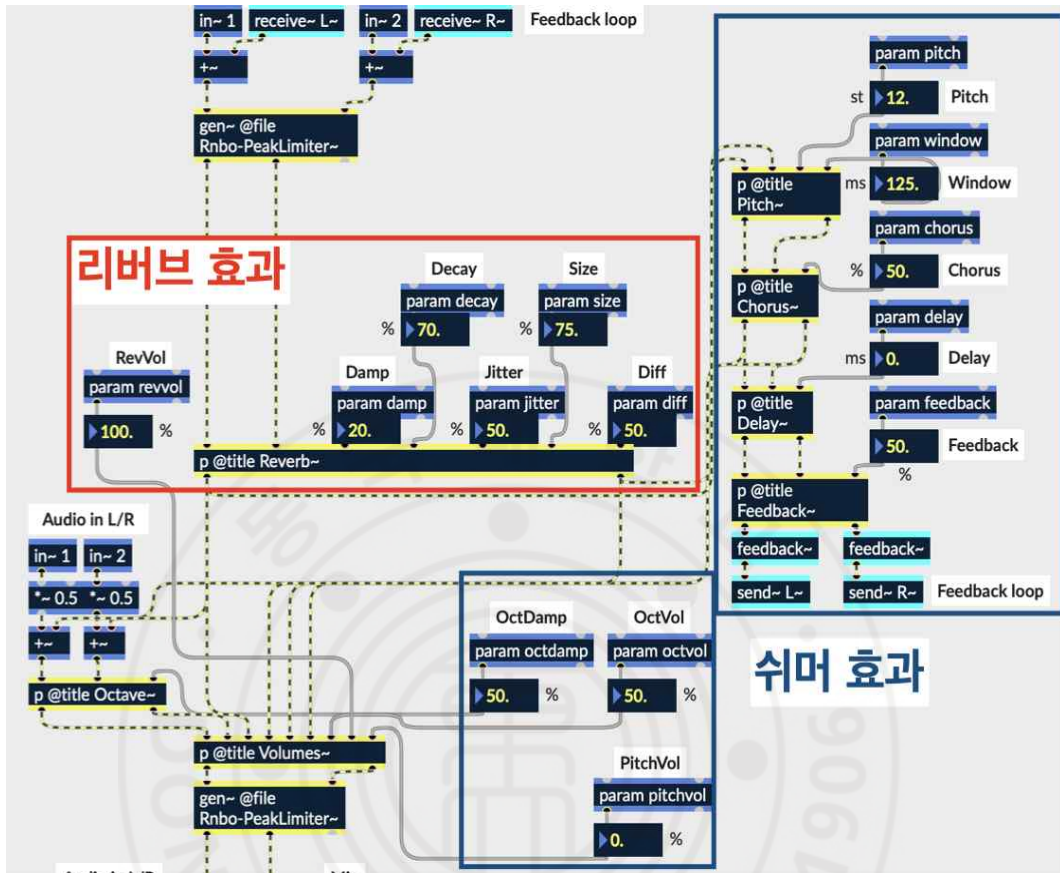
[그림-28]은 Cycling '74의 Manuel Poletti의 RNBO Shimmer Reverb의 패치 모습이다. 이 리버브는 Lexicon 리버브의 디자이너인 David griesinger의 리버브 알고리즘을 모방하여 만든 yafr~오브젝트를 RNBO⁶⁹⁾ 시스템에서 재구성한 것이다. p @title Reverb~ 서브패치가 단순한 리버브 효과를 만들어내는 패치이며, 그 외의 패치는 쉬머 효과를 위한 피치 시프팅, 코러스 효과, 딜레이 효과, 피드백 등 부차적인 처리를 하는 부분이다.

66) 독일의 가상악기 제조회사

67) 음성 신호를 옥타브 위나 아래로 이동시키고 리버브와 혼합하는 방식의 효과

68) Cycling '74의 Manuel Poletti가 디자인한 알고리즘 리버브

69) Real-time Native Block Optimization의 줄임말. Cycling '74에서 개발한 Max에서 구동할 수 있는 시스템이다. 블록 기반 프로그래밍으로 구성하는 각 요소를 모듈화 하여 효율적으로 다루는 고, 컴파일링을 통해 다양한 환경에서 작동하는 것에 초점을 두었다.



[그림-28] RNBO Shimmer Reverb의 패치

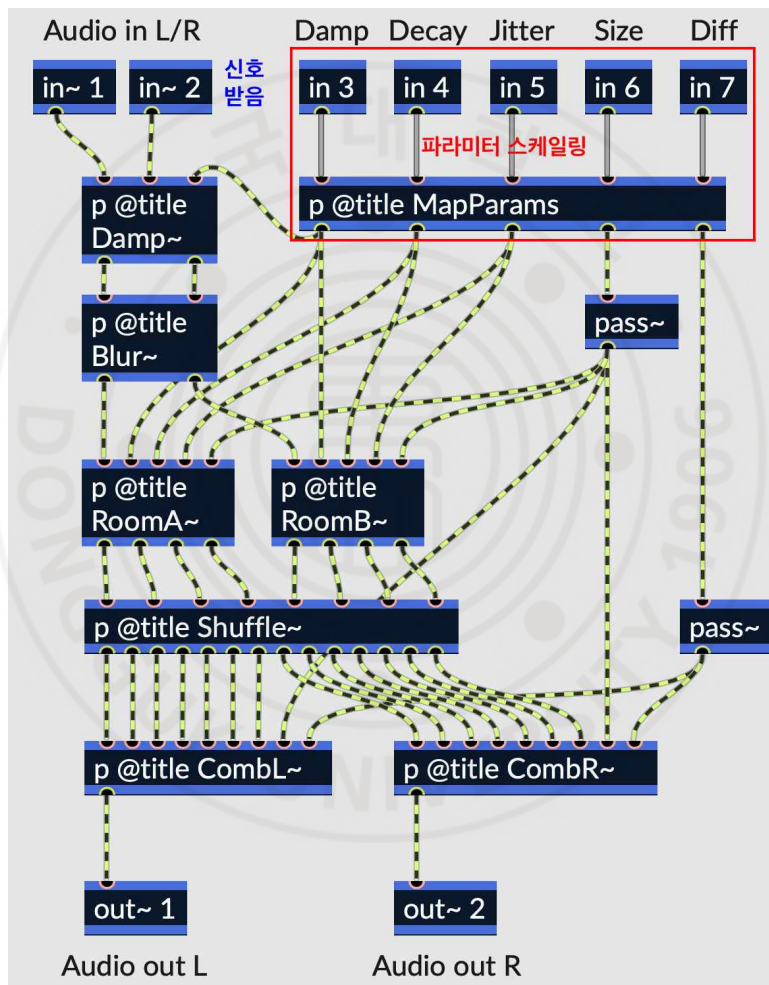
[그림-29]의 p @title Reverb~ 패치의 내부의 in~1과 in~2오브젝트는 음성 신호를 받는다. in 3부터 in 7까지는 파라미터 값을 받고, p @title MapParams 패치에서 필요한 단위에 맞게 스케일링 된다. in~1, in~2를 통해 들어온 신호는 [그림-30]의 p @title Damp~패치 내부의 onepole~오브젝트로 로우 패스 필터링(low pass filtering)⁷⁰⁾을 하여 댐핑(damping)⁷¹⁾ 처리되고, p @title Blur~패치 내부의 allpass~오브젝트로 올 패스 필터링(all pass filtering)⁷²⁾을 하여 중첩

70) 음성 신호의 저음역대만 통과시키는 필터링 방법

71) 잔향이 사라지는 속도를 조절하여 감소시키는 것

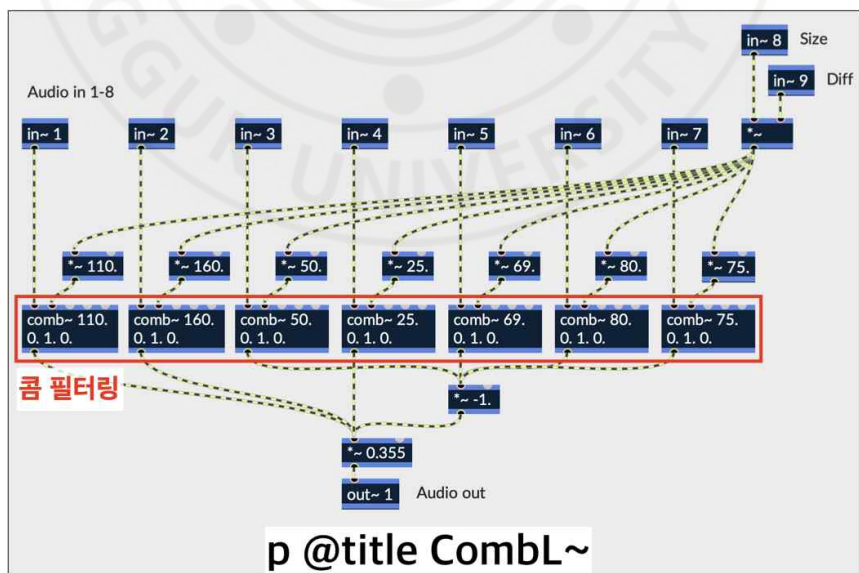
72) 음성 신호의 모든 주파수 대역을 위상 지연시키는 효과

된 에코 효과, p @title RoomA~패치에서 allpass~, comb~, onepole~, delay~ 오브젝트를 거쳐서 리버브가 생성된다. 마지막으로 p @title CombL~에서 comb~를 거쳐 콤 필터링(comb filtering)⁷³⁾을 통해 물리적 공간에서 음파가 반사되어 발생하는 상쇄 간섭을 재현하는 것으로 공간의 크기를 표현하게 된다.



[그림-29] p @title Reverb~ 패치

73) 같은 음성 신호가 약간의 신호 차이를 두고 합쳐질 때, 특정 주파수 대역이 상쇄되어 감소하여 빗 모양으로 필터링이 되는 것을 재현한 효과



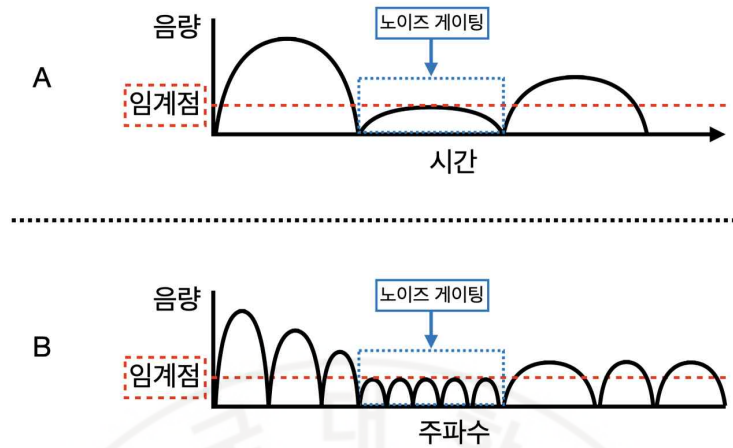
[그림-30] p @title Reverb~ 패치 내부의 신호 처리 패치들

⑤ FFT 분석을 이용한 노이즈 게이트 연구

FFT(Fast Fourier Transform)은 시간 기반의 신호를 주파수 기반으로 변환하는 데 사용되는 알고리즘이다. Max에서는 pfft~ 오브젝트를 이용하여 FFT를 분석할 수 있는데, window size, overlap size가 주요 파라미터이다. window size가 클수록 주파수를 더욱 세밀하게 분할한 블록으로 만들어 분석하게 된다. 예를 들어, 44.1kHz의 신호를 분석하는데 window size가 1024라면 한 블록의 샘플은 1024개가 되고, 약 23ms 동안의 정보를 담게 된다. 이는 분석 결과의 주파수 해상도에 영향을 미친다.

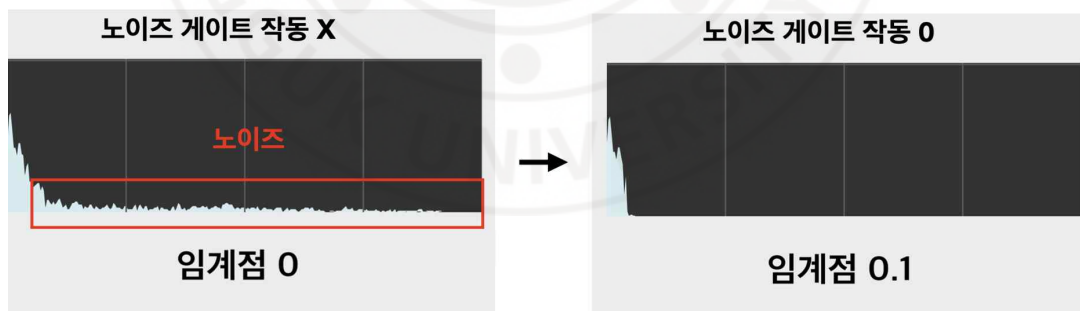
overlap size는 값이 클수록 window size에 의해 나뉘어진 각각의 분할된 블록 간의 겹치는 정도를 조절하여 분석 대상 신호의 변화를 정확하게 포착할 수 있게 된다. 이것은 FFT의 홉(hop)에 영향을 미치게 되고, 곧 분석 결과의 시간 해상도에 영향을 미친다.

FFT를 활용한 노이즈 게이트는 시간 기반 노이즈 게이트보다 더 세밀한 노이즈 제어가 가능하다. 시간 기반 노이즈 게이트는 시간의 흐름에 따라서 신호의 크기를 감지하고, 임계점(threshold) 이하로 내려가면 게이팅 하게 된다. 즉, 소리가 아예 안 나거나, 나거나 둘 중 하나의 결과를 얻게 된다. 반면에 FFT를 통한 노이즈 게이트는 각 주파수 대역을 분석하여 임계점 이하의 신호가 있는 주파수 대역만 게이팅 함으로써, 노이즈가 제거된 신호를 결과물로 얻을 수 있게 된다.



[그림-31] 시간 기반 노이즈 게이트(A)와 주파수 기반 노이즈 게이트(B)의 작동 방식

피에조 픽업의 신호를 처리하기 위한 패치 [그림-10]에서 `pfft~ngate~` 오브젝트로 FFT 노이즈 게이트가 사용되었다. [그림-32]는 같은 신호를 입력받은 두 개의 `pfft~ngate~`에서 임계점 값만 다르게 설정한 상태의 주파수 스펙트럼이다. 임계점이 0인 상태는 노이즈 게이트가 작동하지 않는 상태이다.



[그림-32] FFT 노이즈 게이트 작동 여부에 따른 주파수 스펙트럼 차이

3. 손동작에 의한 사운드 인터랙션

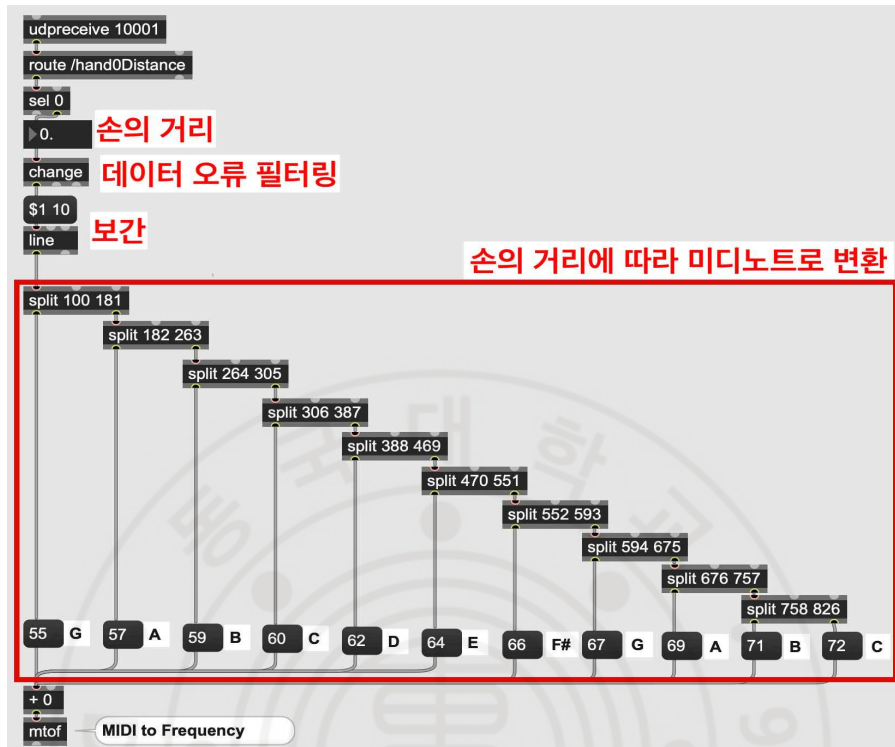
손동작을 통해서 DIMENSION의 사운드를 실시간으로 제어하기 위해서 연구하였다.

1) 손동작과 음고 제어 인터랙션

[그림-6]의 TouchDesigner로부터 OSC를 통해 받은 손의 트래킹 정보는 Max에서 사운드와 인터랙션 된다.

Max에서 손의 거리에 따라 DIMENSION의 음고를 제어하는 것에 데이터 필터링과 보간을 하였다. [그림-33]은 해당 기능을 하는 패치이다. change는 손의 위치 변화가 없는 상태에서 반복되는 데이터 입력 신호로 인한 오류를 필터링한다. line은 데이터의 급격한 변화로 인한 오류를 보간을 통해 완화한다. 이렇게 처리된 데이터는 split을 거쳐, 거리 값의 일정 범위에 따라 각각 미디 노트로 변환된다. 손의 거리에 따라 연주되는 음들은 G 메이저(Major)⁷⁴⁾ 스케일이다. 이 스케일의 반음, 온음 구조에 맞게 센서 출력된 값의 범위인 100부터 826을 분할하여 split오브젝트에 할당하였다.

74) 사장조 음계

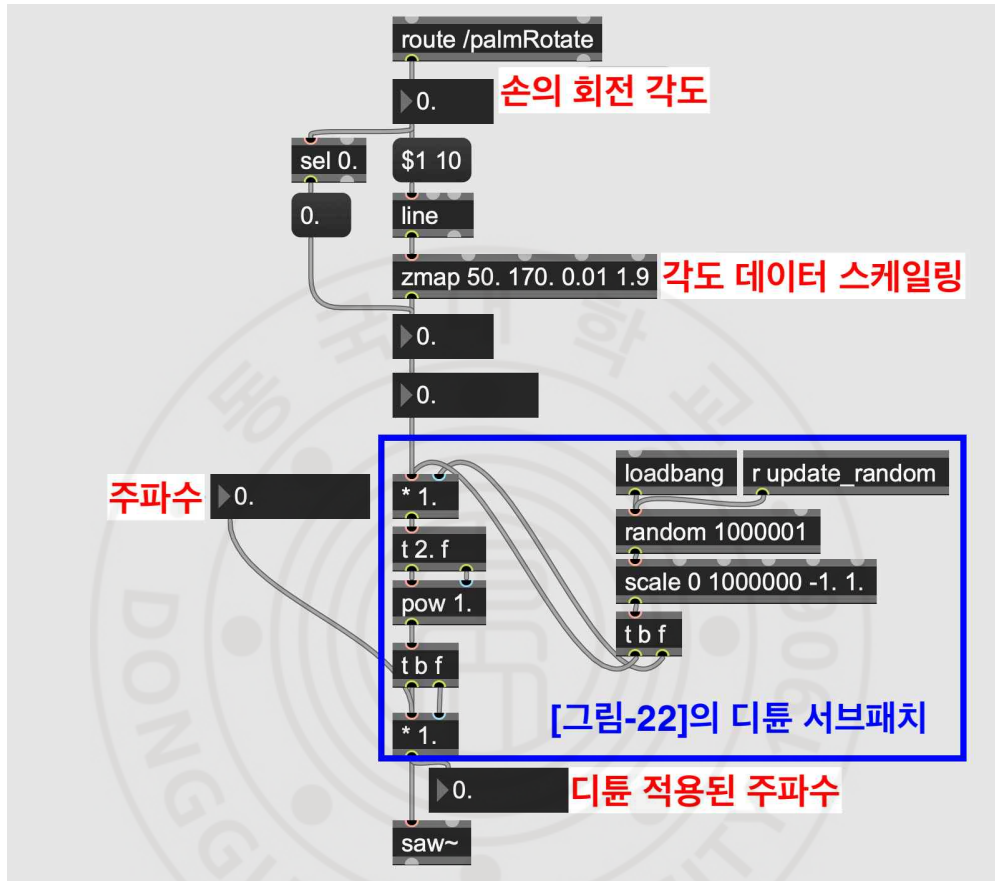


[그림-33] 손의 거리 데이터를 음고로 변환하는 패치

2) 손동작과 디튼 제어 인터랙션

손의 회전 각도에 따라서 오실레이터의 디튼 정도를 제어하는 인터랙션에는 보간과 스케일링이 적용되었다. line을 이용하여 급격한 손의 움직임에도 부드러운 디튼 변화를 위해서 보간하고, zmap오브젝트를 이용하여 입력된 데이터를 스케일링 하여 출력하는 패치이다. 손의 회전 값에 따라서 saw~오브젝트의 주파수 값이 디튼 되는 량을 조절하는 구조이다.

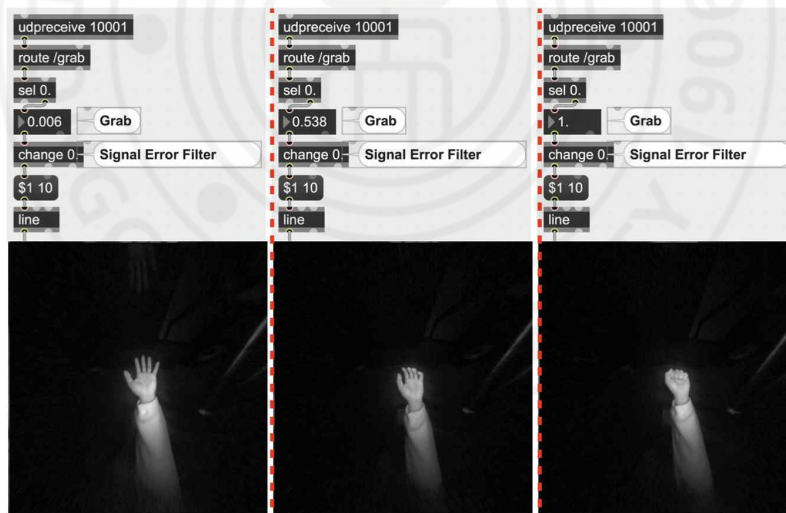
[그림-34]는 앞서 설명한 보간, 스케일링 기능을 하는 패치와 [그림-22]의 디튠 패치가 연결된 형태의 패치이다.



[그림-34] 데이터 보간, 스케일링과 디튠 패치

3) 손동작과 딜레이 효과 제어 인터랙션

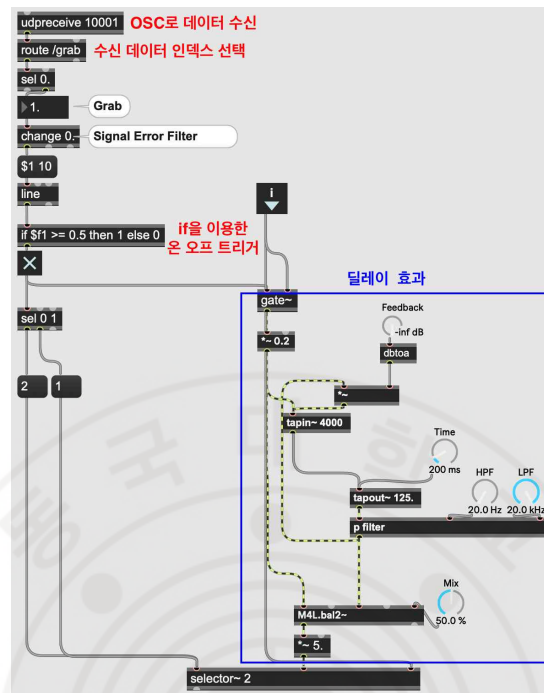
손의 트래킹 그래프에 대한 데이터 값을 이용하여 딜레이 효과의 온·오프 제어에 사용하였다. 손을 펴면 0, 완전히 쥐면 1이 출력되고, 그 정도에 따라서 상응하는 0에서 1사이의 값이 출력된다. [그림-35]에서 완전히 폼을 때 0이 아닌 0.006이 출력된 이유는, [그림-36]의 패치에서 sel 오브젝트⁷⁵⁾의 두 번째 아웃렛으로 출력되도록 구성하여 0 값을 무시하도록 설계했기 때문이다. 이는, 연주 중간에 센서의 인식 범위에 손이 존재하지 않더라도, 기존의 값이 유지되도록 하기 위함이다. 손의 거리 데이터 값 처리와 같이 change와 line을 통해서 필터링 및 보간 처리를 한 뒤, if 오브젝트에 \$f1 >= 0.5 then 1 else 0 식을 사용하여 0.5 이상의 값이 들어올 때 딜레이가 켜지도록 하였다.



손을 완전히 폼 손을 절반 쥐 손을 완전히 쥐
값 0.006 값 0.538 값 1

[그림-35] 손을 쥐고 폼 정도에 따른 데이터 값

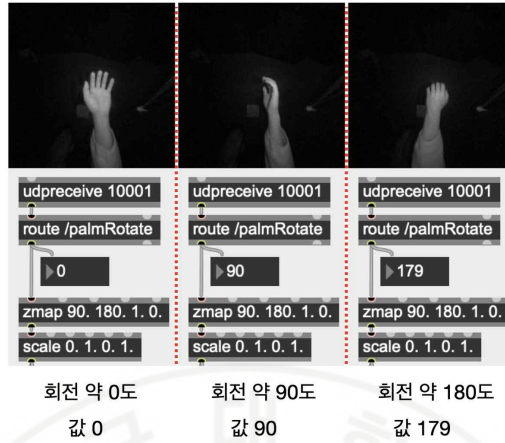
75) 마지막 아웃렛을 제외한 아웃렛에서는 sel 오브젝트에 입력된 숫자 값이 출력된다. 마지막 아웃렛은 오브젝트에 입력된 숫자 이외의 모든 숫자 값이 출력된다.



[그림-36] 딜레이 효과 패치를 grab값으로 온·오프 제어하는 패치

4) 손동작과 리버브 효과 인터랙션

DIMENSION의 발현 사운드에는 손의 회전 각도에 따라서 리버브 효과에 대한 인터랙션을 적용하였다. 손의 회전 각도에 따라서 Raum 리버브의 rate 값과 feedback 값이 변화하도록 하였다. [그림-37]은 손의 회전에 따른 데이터 값의 출력을 보여주는 그림이다.



[그림-37] 손의 회전 각도에 따른 데이터 값

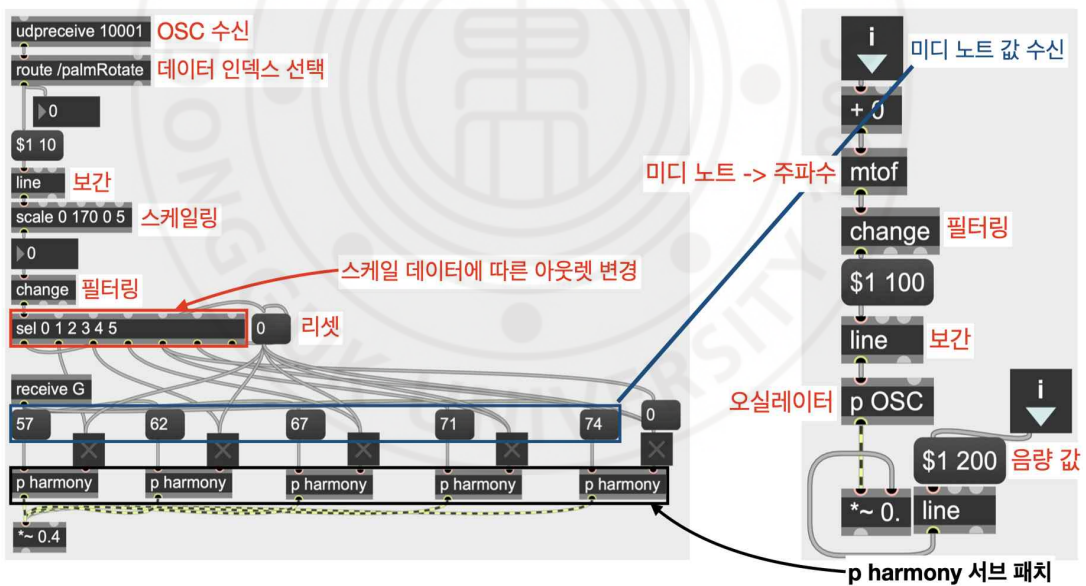
[그림-38]는 zmap과 scale을 이용해서 회전 값을 리버브의 파라미터 값에 맞게 스케일링하고 적용한 패치이다.



[그림-38] 손의 회전 값에 따른 Raum 리버브 인터랙션 패치

5) 손동작과 화음 인터랙션

DIMENSION의 착현 사운드에는 손의 회전 값에 의한 화음을 인터랙션으로 적용하였다. 손의 회전하는 정도에 따라서, 기존에 연주되던 음에 다이어토닉 스케일⁷⁶⁾ 상의 화음이 추가되는 구조이다. [그림-39] 패치에서 손의 회전 값 0~170을 scale을 통하여 0부터 5의 숫자로 변환한다. sel에서 인렛으로 받은 0부터 5의 숫자에 따라서 각각 첫 번째부터 다섯 번째까지 아웃렛으로 신호를 내보낸다. 이때 각 아웃렛과 연결된 토글 스위치⁷⁷⁾는 신호를 받을 때 켜진다. 이후 한 번 더 받으면 토글 스위치는 꺼지게 된다. 토글 스위치들은 각각 line을 거쳐 연결된 오실레이터의 amplitude envelope으로써 기능을 하게 된다.



[그림-39] 손의 회전에 따라서 화음이 추가되는 패치

76) 온음계적 스케일. 조성 안에 포함되는 음들의 집합.

77) 켜고 꺼지는 상태가 전환이 가능한 방식의 스위치

4. 비주얼 디자인

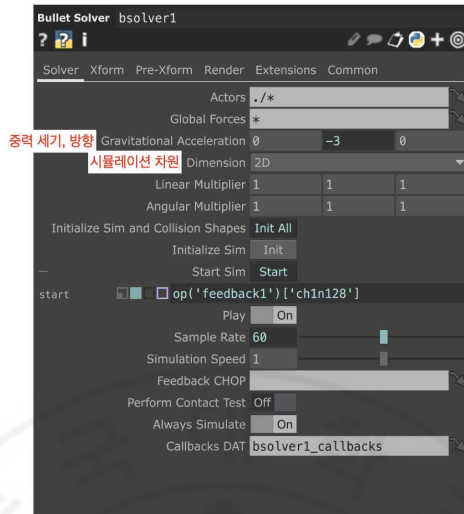
본 연구에서는 4차원 시공간을 표현하기 위해서 점, 선, 면, 입체 도형, 4차원 다포체⁷⁸⁾를 시각화하였다. 모든 비주얼 디자인(visual design)은 TouchDesigner에서 제작되었다.

1) 물리 엔진을 이용한 비주얼

작품의 첫 번째 장면은 물리 엔진을 이용하였다. TouchDesigner의 물리 엔진인 Bullet Solver COMP를 생성하고, 내부에 Actor COMP와 Actor COMP에 연결되어 물리 엔진 속에서 작동할 오브젝트가 존재해야 물리 엔진이 작동한다. Bullet Solver는 물리 엔진의 시뮬레이션 차원, 중력 등을 파라미터 값을 입력하여 조절할 수 있다. [그림-40]은 Bullet Solver COMP의 파라미터 창이다. 하늘색 글씨는 외부 오퍼레이터의 값을 참조하여 파라미터 값으로 사용하고 있는 상태를 의미한다.

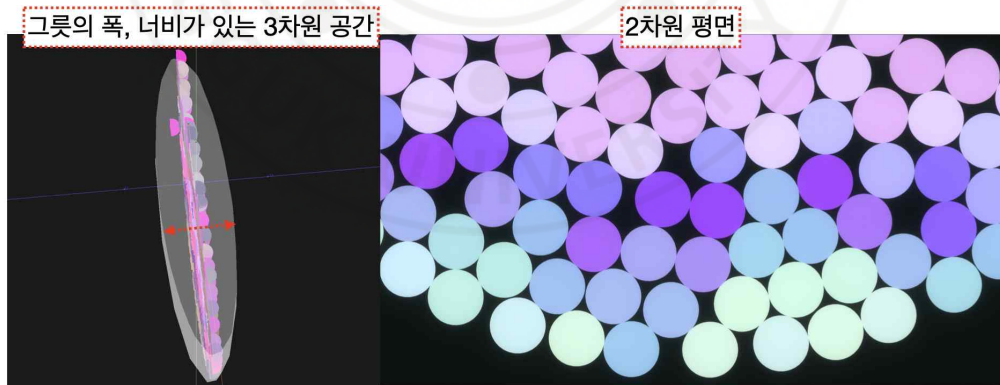
중력은 x, y, z 방향으로 작용하게 되는데, 숫자 값이 클수록 더 강한 힘이 작용한다. x, y, z 값이 모두 0일 때는 중력이 작용하지 않는다. 중력을 조절하는 값은 모두 실시간으로 제어될 수 있다.

78) 입체 도형에 차원을 추가한 것



[그림-40] Bullet Solver COMP의 파라미터 창

시뮬레이션 차원은 1D, 2D, 3D 세 가지가 있는데, 이들 모두 물리 엔진에 사용된 3D 공간이 어떤 형태이든 설정된 차원 대로만 시뮬레이션한다. 본 작품의 공간은 3차원 형태의 그릇이지만, 2D로 차원을 설정하여 마치 공들이 면에서 움직이듯 보여진다. [그림-41]은 해당 설명에 대한 이해를 돕기 위한 작품 비주얼의 장면이다.



Actor COMP의 3D 오브젝트 뷰

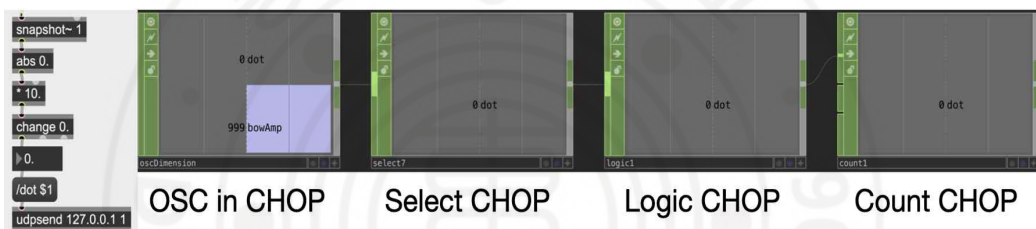
작품의 비주얼

[그림-41] 3차원 공간에서의 2차원 시뮬레이션

Actor COMP는 운동 상태(kinematic state), 충돌 형태(collision shape), 마찰(friction), 굴림 마찰(rolling friction), 반발 계수(restitution) 등을 파라

미터 값을 입력하여 조절할 수 있다. 특히 운동 상태는 고정된 개체와 이동하는 개체에 따라서 Dynamic, Static으로 구분 지어 사용해야 사용자가 의도한 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있다.

첫 번째 장면에서는 DIMENSION을 연주할 때와 테이프음악의 Sculpture로 만든 발현 악기 사운드 마다 떨어지는 공과, 공을 담을 투명한 형태의 그릇이 주된 요소이다. [그림-42]는 악기가 연주될 때 마다 Max에서 TouchDesigner로 OSC를 통한 신호를 전송하여 공을 생성하게 하는 Max 패치와 TouchDesigner의 네트워크이다.



[그림-42] Max OSC 송신 패치와 OSC 신호에 따라 공을 생성하는 TouchDesigner 네트워크

그릇을 만들기 위해서 Sphere SOP⁷⁹⁾으로 구를 만들었다. 그리고 Clip SOP을 이용하여 구의 상단 절반을 잘라내었다. 이후 크기 조절을 위해서 Transform SOP을 연결한 뒤, Actor COMP에 연결하였다. 투명하게 만들기 위해서 Constant MAT⁸⁰⁾을 Actor COMP에 연결하고 알파⁸¹⁾(alpha)값을 0으로 설정하였다.

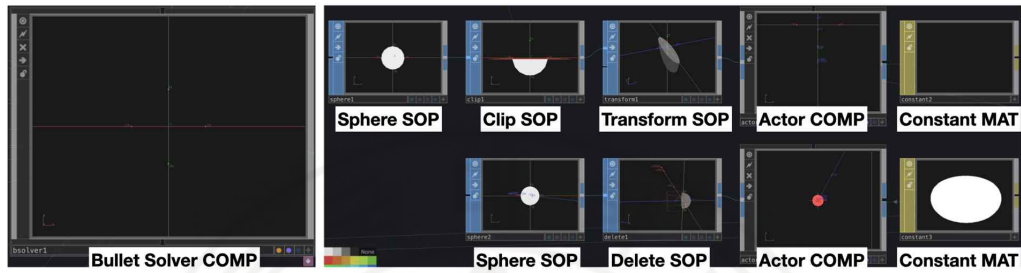
떨어지는 공(Ball)을 생성하기 위해서 추가로 Sphere SOP을 생성했다. 과도한 연산량으로 시스템의 성능 저하를 막기 위해서 Delete SOP

79) Surface Operator의 줄임말. Mash, Polygon 등 3D 오브젝트를 다룬다.

80) Material Operator의 줄임말. 3D 오브젝트에 색, 질감 등을 부여한다.

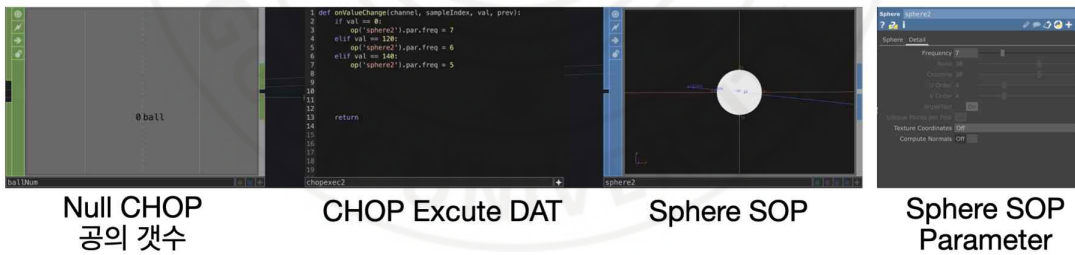
81) 디지털 이미지에서 투명도를 나타내는 값. 1은 불투명, 0은 투명한 상태를 의미한다.

으로 눈에 보이지 않는 구의 뒷 부분을 제거하였다. 이후 Actor COMP에 연결하였다. 구의 색을 부여하기 위해서 Constant MAT을 Actor COMP에 연결하였다. [그림-43]은 앞선 설명의 이해를 돕기 위한 그림이다.



[그림-43] Bullet Solver COMP와 그 내부의 3D 오브젝트와 Actor COMP

추가로, 장면의 진행에 따라서 공의 수가 많아지는 것으로 인한 성능 저하를 막기 위해서 실시간으로 공의 숫자를 측정하여 공을 구성하는 포인트(point)⁸²⁾ 수를 감소시켰다. [그림-44] CHOP Excute DAT⁸³⁾을 이용하여 단순한 파이썬(python) 조건문으로 작동한다.



[그림-44] 공의 포인트 감소를 위한 네트워크

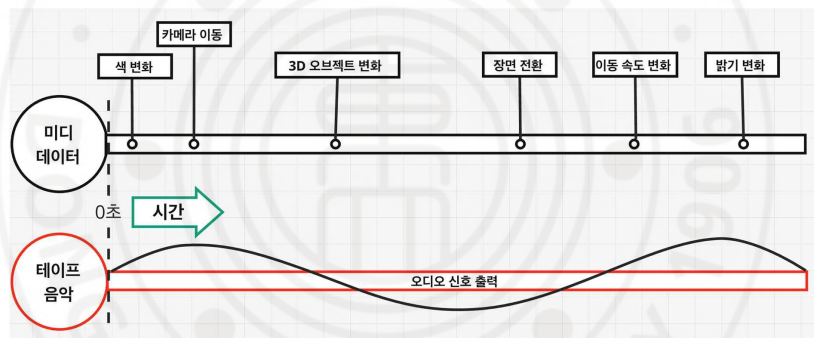
if val == 0:은 val 값이 '0'인 조건이 참일 경우 아래 문장을 실행하는 것이다. op('sphere2').par.freq = 7은 Sphere SOP 2의 feq 파라

82) 3D 모델을 구성하는 요소.

83) Data Operator의 줄임말. 텍스트 프로그래밍, 텍스트, 테이블 등 문자 기반 데이터를 다룬다.

미터를 7로 변경하라는 의미의 문장이다. elif은 if와 같이 val의 숫자 조건을 따지지만, 앞선 조건이 모두 아닐 경우라는 추가 조건을 갖는다.

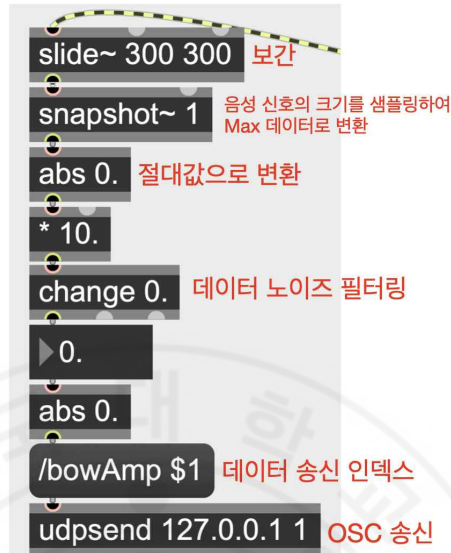
장면의 진행을 위한 트리거로는 Logic Pro를 사용해서 테이프음악과 동기화시켜 둔 미디 데이터를 이용하였다. 0번부터 127번까지의 미디 노트(note)를 각각 색 전환, 카메라 이동, 3D 오브젝트의 형태 변화 등 시각적 요소를 제어하기 위해서 입력하였다. 이후 미디 데이터로 출력하여 TouchDesigner에 불러온 뒤, 테이프음악과 동기화시켰다. [그림-45]은 미디 데이터와 테이프음악의 동기화에 대한 이해를 돕기 위한 그림이다.



[그림-45] 미디 데이터와 테이프음악의 동기화 예

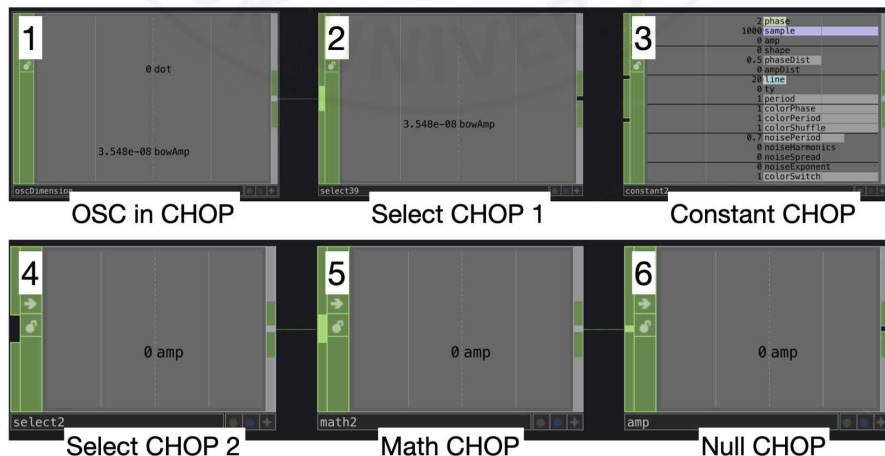
2) 파형을 이용한 비주얼

작품의 두 번째 장면은 사인파(sine wave), 삼각파(triangle wave), 사각파(square wave) 등을 시각화한다. DIMENSION의 착현 악기 사운드의 음량이 비주얼의 시각화된 파형의 진폭을 제어하고, 주기, 위상, 색 등은 테이프음악과 동기화된 미디 데이터로 제어한다. [그림-46]은 Max에서 보간, 필터링을 거쳐서 OSC로 데이터를 전송하는 패치이다.



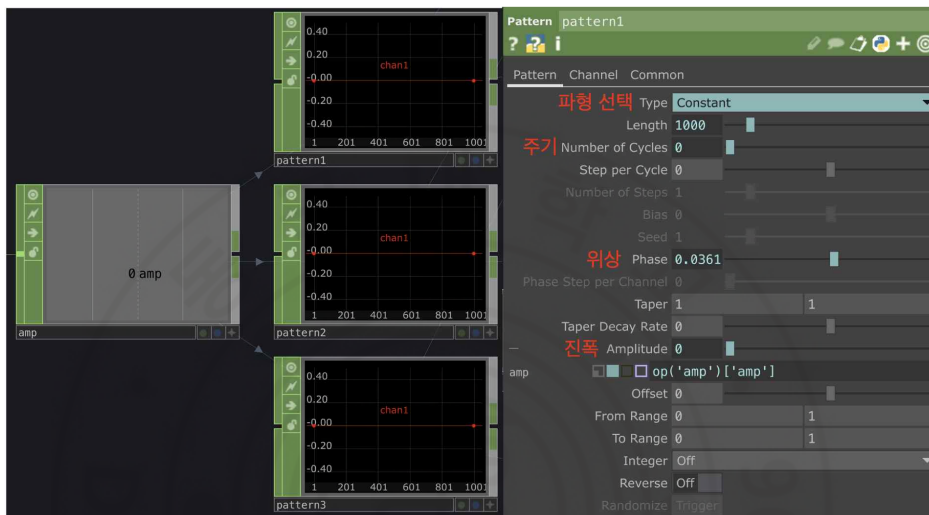
[그림-46] 찰현 사운드의 음량 값을 OSC로 보내는 패치

[그림-47]은 TouchDesigner에서 데이터를 수신 및 처리하는 네트워크이다. OSC in CHOP으로 수신한 데이터를 Select CHOP 1에서 선택하고 Constant CHOP에 취합 되어있는 데이터 리스트에 포함한다. Select CHOP 2에서 음량 값만 선택한 뒤, Math CHOP에서 비주얼에 사용하기 적절한 범위로 스케일링한다. 이후 Null CHOP으로 데이터를 오퍼레이터 파라미터에 연결한다.



[그림-47] TouchDesigner에서 OSC로 받은 음량 값을 처리하는 패치

[그림-48]은 Null CHOP과 그에 연결된 Pattern CHOP과 파라미터 창이다. Pattern CHOP들은 파형을 표현하는 오퍼레이터로, 파형, 주기, 위상, 진폭 등을 조절 가능하다. 해당 오퍼레이터로 파형을 시각화하여 비주얼을 제작하였다.



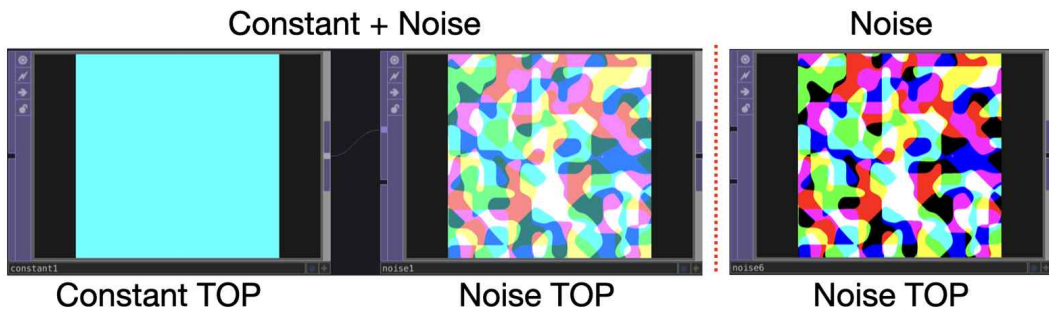
[그림-48] Pattern CHOP의 파라미터

[그림-49] 변화하는 색은 하늘색을 더한 노이즈를 사용하였는데, 음악의 고조됨에 따라서 노이즈의 하모닉스(harmonics)⁸⁴, 하모닉 스프레드(harmonic spread)⁸⁵, 지수(exponent)⁸⁶가 증가하며 채도가 낮은 색에서 점차 채도가 강해진다.

84) 노이즈의 고주파 색상 대역을 추가한다.

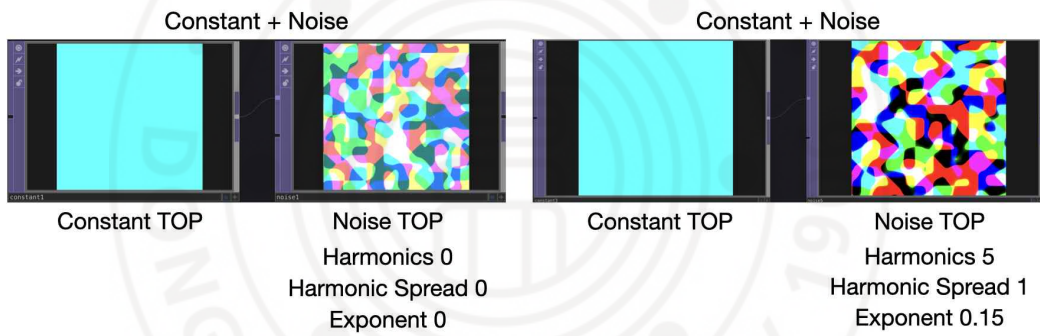
85) 노이즈의 색상 사이의 분포를 조절한다. 값이 낮으면 고르게 분포 되고, 크면 흩어진다.

86) 노이즈의 밝기 값을 비선형으로 변형. 값이 낮으면 부드러운 대비, 값이 높으면 더 강한 대비로 밝은 영역이 두드러지게 되어 선명해진다.



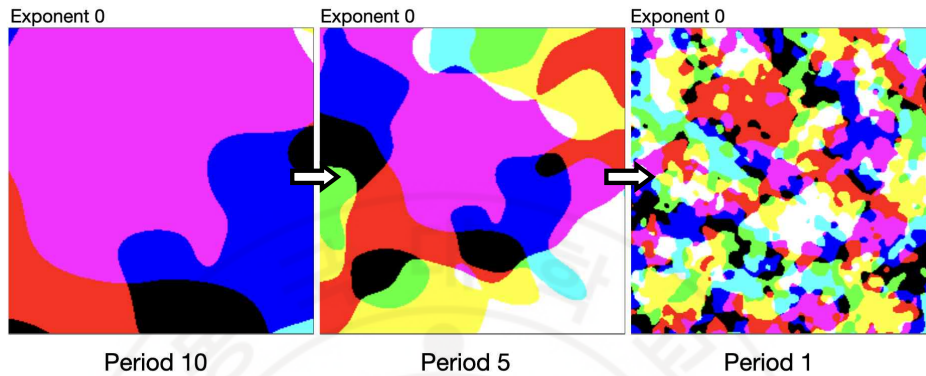
[그림-49] 하늘색이 더해진 노이즈(좌), 일반 노이즈(우)

[그림-50]은 노이즈의 하모닉스, 하모닉 스프레드, 지수 값에 따른 색의 변화를 보여주는 그림이다.



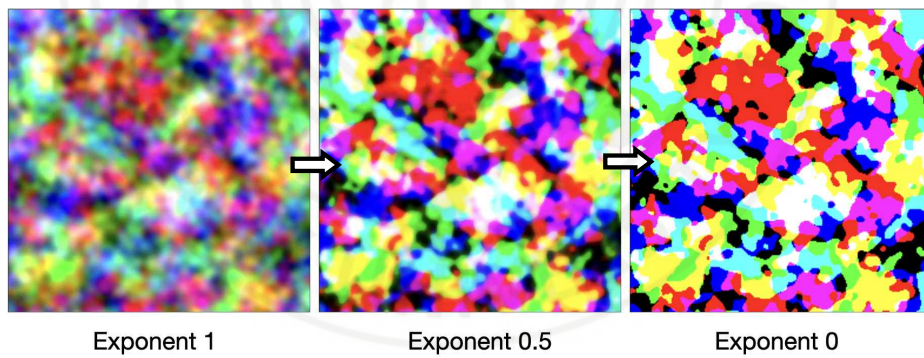
[그림-50] 하모닉스, 하모닉 스프레드, 지수에 따른 노이즈의 색 변화

[그림-51]는 노이즈의 주기(peirod)가 변화하며 표현되는 색의 수가 변화하는 것을 보여준다. 이 효과 또한 [그림-49]의 노이즈에 적용되어 시각적 변화를 추가하였다.



[그림-51] 주기에 따른 노이즈의 색 변화

[그림-52] 노이즈의 지수(exponent)가 감소하며 색의 구분이 확실해지는 것을 보여주고 있다.



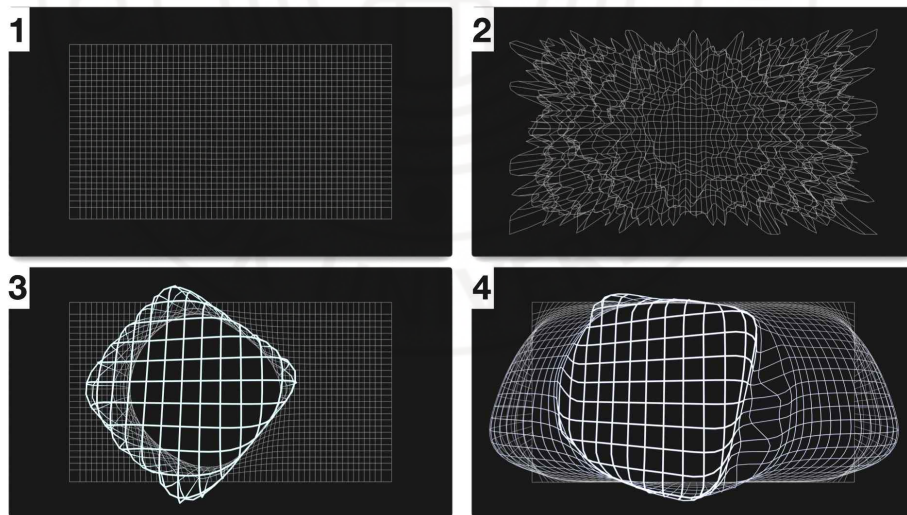
[그림-52] 지수에 따른 노이즈의 선명도

[그림-50, 51, 52]의 효과들은 작품의 진행에 따라서 값이 변화하며 색의 변화를 표현하는 것에 사용되었다.

3) 아나모픽 효과를 이용한 비주얼

비주얼의 입체감을 살려 관객의 몰입도를 증진시키기 위해서 아나모픽(anamorphic) 기법을 사용하였다. 넓은 의미에서 아나모픽은 이미지를 왜곡하여 표현하고, 관찰하는 방식이나 장치 등에 따라서 왜곡되기 전의 원래 모습으로 보게 되는 기법을 의미한다. 15세기 중반 르네상스 시대 이탈리아에서 ‘선원근법’이라는 이름으로 처음 연구된 이후 17세기 바로크 시대에 들어 ‘아나모르포시스’라는 아나모픽 기법의 배경이 되는 연구가 등장하였다⁸⁷⁾.

아나모픽 기법의 방식에는 시점 방식, 그리드 방식, 거울 반사 방식, 렌즈 방식, 디지털 프로젝션 방식이 있는데, 본 작품에서는 그리드 방식으로 아나모픽을 표현하였다. 중력에 의해서 시공간이 왜곡되는 것은 그리드가 입체 도형에 의해서 왜곡되는 것으로 표현하였다.



[그림-53] 아나모픽 기법을 사용한 비주얼

87) 최성록, 「3D 애니메이션 기법을 활용한 아나모픽 미디어아트 제작 연구 -<서울환상소경>중심으로-」 『예술과미디어』 제23권1호 (2024.05), 159-179쪽

III. 연구 기술의 작품 적용

직접 제작한 악기 DIMENSION으로 연주된 멀티미디어 인터랙션 작품 <Tesseract>는 2024년 11월 9일 동국대학교 이해랑예술극장에서 진행된 한국멀티미디어음악학회(SIMM)에서 주최한 공연 ‘SEEING SOUND LISTENING IMAGE 2024’에서 초연되었다.

1. 작품 소개

‘4차원 세계에서 존재하는 3차원 존재는 2차원의 지각을 한다.’ 차원의 개념에서 우리 인간을 묘사하는 문장이다. 우리는 무슨 수를 쓰더라도 사물의 앞을 보는 동시에 뒤를 볼 수는 없다. 3차원의 입체적인 존재임을 인지하고 있으나, 결국에는 면으로 인식할 뿐이다. 때문에 4차원의 시공간 자체를 이해하는 것조차 쉽게 할 수 없다. 본 연구자는 ‘음악이라면 시간을 기반으로 만들어지며, 스테레오 이미지(stereo image)⁸⁸⁾에서 입체감을 느낄 수 있기 때문에, 4차원 시공간에 근접한 예술의 형태가 아닐까’라는 생각을 시작으로 이 작품을 구상하였다. 이에 더해, 점으로 시작하여 4차원 시공간을 상징하는 다포체로 변모하는 과정을 시각화하는 것으로, 인지할 수 없는 차원을 표현하기를 시도했다.

작품의 시작인 테이프음악의 첫 부분은 신비로운 느낌을 주는 사운드로 시작한다. 테이프음악에 사용된 악기 소리는 서서히 음량이 증가하여 청취자가 존재를 자연스럽게 인지하도록 하였다. 리듬 또한 작품이

88) 음악의 좌, 우 스피커간의 음향 배치를 통해 형성되는 공간적 인상

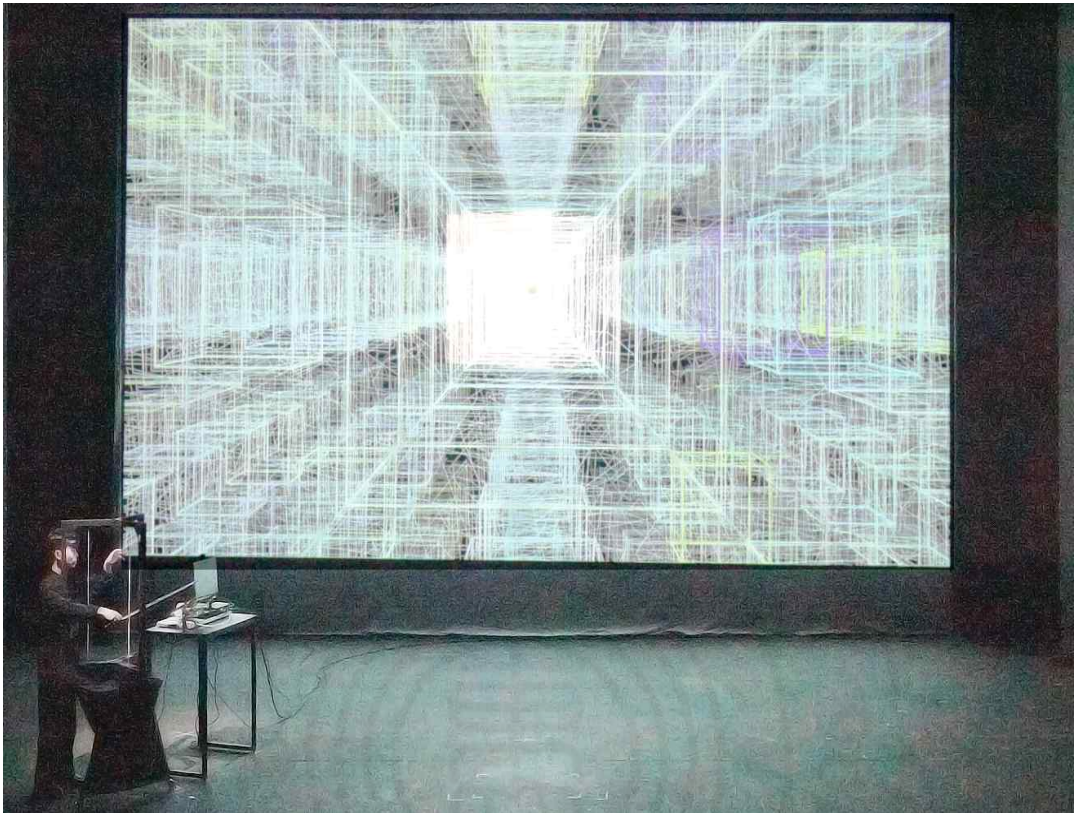
진행됨에 따라 서서히 더욱 작은 분박으로 나누어지고, 곡의 빠르기도 천천히 상승한다. 아나모픽 그리드 장면이 나오는 부분에서는 그리드의 왜곡에 따라 일부 악기의 음고가 급격하게 변화하며 시간이 왜곡되는 것을 표현했다. 이어서 4차원의 다포체의 모습이 나타난 장면에서는 실제로 볼 수 없는 미지의 세계를 실제로 만나게 된 것 같은 연출을 위해서 웅장한 사운드의 음악을 표현하였다.

오른손을 이용한 DIMENSION의 발현 연주는 0차원의 점을 상징하고, 칼현 연주는 1차원의 선을 상징한다. 왼손을 이용하여 음고, 음색 등을 제어하는 것은 1차원 선의 이동으로 발생하는 2차원의 면을 상징하고, 2차원 면이 이동하며 생성되는 3차원의 입체 도형을 상징한다.

2. 작품 구성

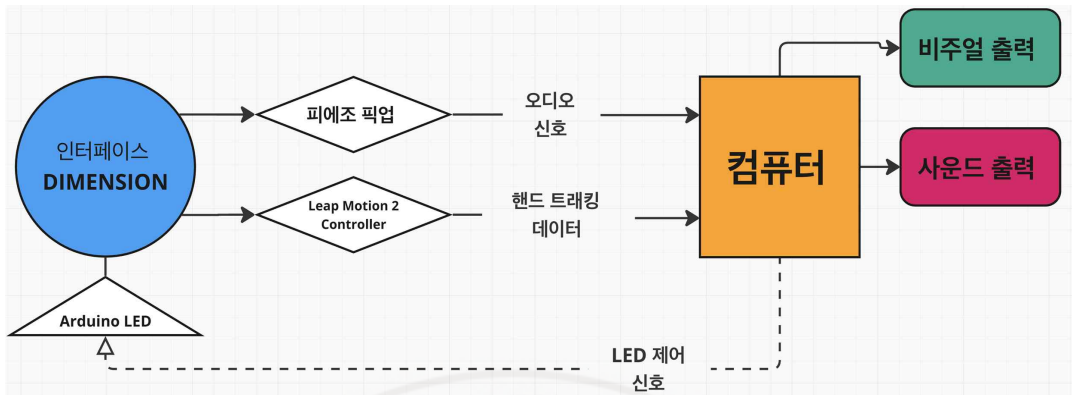
1) 무대 구성

무대는 연주자와 악기, 메인 스크린에 상영되는 비주얼로 구성되었다. 무대 스크린을 중심으로 좌측에 연주자와 악기가 배치되었다. [그림-54]



[그림-54] 무대 사진

무대에서 라이브 퍼포먼스를 위해서 컴퓨터와 오디오 인터페이스, 믹서 등을 사용하여 시스템을 구성하였다. [그림-55]는 라이브 퍼포먼스 시스템에 대한 이해를 돕기 위한 그림이다. DIMENSION은 피에조 픽업을 통해 수음된 음성 신호와 Leap Motion으로 트래킹한 데이터를 컴퓨터로 송신하고, Arduino LED를 제어하기 위한 신호를 수신한다. 컴퓨터에서는 Max와 TouchDesigner를 구동하여 음성 신호와 핸드 트래킹 데이터를 처리하며, Arduino IDE를 구동하는 것으로 LED제어를 위한 신호를 처리하고 전송한다. 컴퓨터는 최종적으로 비주얼과 사운드를 출력한다.



[그림-55] 라이브 퍼포먼스 시스템 구성도

2) 음악 구성

본 작품은 Intro - A - B - C - D파트의 구성으로 나뉘어진다. 4분의 4박자로 작곡되었고, G장조이다. 곡의 진행에 따라서 BPM⁸⁹⁾의 변화가 있다.

<표-1> 작품 파트별 타임라인과 BPM

파트	Intro	A	B	C	D
타임라인 (분:초:프레임)	0:00:00~ 0:15:59	0:16:00~ 2:23:59	2:24:00~ 4:54:18	4:54:19~ 5:49:9	5:49:10~ 7:52:36
마디	4	32	40	16	36
BPM	60	60	60-62-64 -66-68	70	70

89) Beat Per Minute의 줄임말. 곡의 빠르기를 나타내는 용어.

Intro는 테이프음악의 중고음역 패드(pad) 악기⁹⁰⁾ 사운드로 시작되고, 저음역의 패드 사운드가 추가되며 진행된다.

A파트는 DIMENSION으로 연주되는 사각파로 만든 발현 악기 사운드가 시작된다. 디튠으로 인한 음색 변화와 리버브 효과와 딜레이 효과의 변화로 인한 사운드 변화가 발생한다. 테이프음악은 패드 사운드가 점진적으로 추가되고, A파트의 15번째 마디를 지날 시점에 Sculpture로 만든 발현 악기 사운드가 추가된다. 이후 Serum으로 만든 톱니파 악기 사운드로 리듬을 표현한다.

B파트는 A파트의 공간을 꽉 채운 패드가 사라지고 Serum으로 만든 톱니파 악기의 리듬과 DIMENSION의 발현 악기 사운드로 진행된다. 테이프음악은 점차 고조되며, Serum과 Alchemy로 만든 발현악기 사운드로 리듬을 채운다.

C파트는 DIMENSION의 연주 없이 테이프음악만으로 이루어졌다. Sampler를 이용하여 시갯바늘 소리와, 킥(kick), 스네어(snare) 사운드로 리듬을 구현하였다. 그리고 Serum을 이용해 만든 리드(lead)와 베이스(bass) 사운드로 선율을 이끌어간다.

D파트는 다시 DIMENSION의 연주와 테이프음악이 함께 진행된다. DIMENSION의 발현 악기 사운드는 계속 상승하는 선율 구조로 연주되고, Serum, Alchemy, ES2, Sculpture로 만든 악기 사운드와 Sampler를 이용한 강한 리듬으로 절정 구간을 표현했다.

90) 긴 지속을 시간 기반의 부드러운 질감의 사운드를 가진 악기

3) 작품 구성 및 인터랙션 효과

영상은 점, 선, 면, 입체도형, 다포체를 표현한다. 점에서 시작해서 다포체로 변화하고 마지막에 다시 점으로 돌아오는 것으로 끝난다. DIMENSION의 사운드와 테이프음악이 영상과 인터랙션된다.

① Intro파트

Intro는 영상이 페이드 인(fade-in) 되며 시작한다. 테이프음악의 패드 악기 사운드가 시작된다.



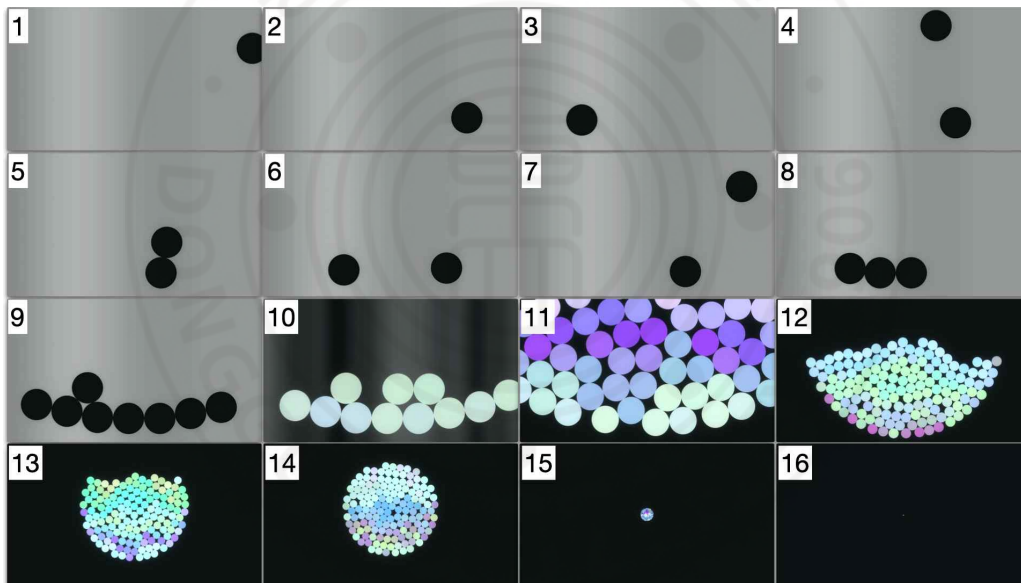
[그림-56] Intro파트 비주얼의 진행

② A파트

A파트는 DIMENSION의 발현 연주에 따라서 공이 화면 밖에서 하나씩 떨어지는 것으로 0차원 존재가 2차원 공간에 존재하는 것을 표현했다. 물리 엔진으로 인해, 그릇 형태의 투명한 3D 오브젝트에 담겨서 좌, 우로 흔들린다. 공이 쌓일수록 서로 부딪혀 흔들림을 멈추고 점차 쌓이게 된다. 쌓이는 중간에 배경의 색은 검은색, 공의 색은 무작위로 변화한다. 공이 그릇에 가득 쌓이면 그릇이 반원 형태에서 원으로 변하고 물리 엔진의 중력이 0으로 바뀌어 공들이 그릇을 꽉 채우게 된

다. 공으로 가득 찬 그릇은 점차 작아져서, 공들이 구분되지 않을 지점까지 축소된다. [그림-57]의 1번부터 8번은 공이 생성되어 서로 충돌하며 쌓이기 시작하는 장면, 9번과 10번은 색이 변화하는 장면, 11번부터 13번은 공이 가득 찬 뒤 그릇이 반원에서 원으로 변화하는 장면, 14번에서 16번은 축소되는 장면이다.

테이프음악은 패드 사운드에서 공의 수가 많아지는 것, 색이 변화하는 것에 따라서 발현 악기 사운드가 추가되고, 인트로부터 이어져 온 패드 사운드에 비해 더 거칠고 강한 느낌의 패드가 리듬을 표현한다. DIMENSION은 발현 연주를 이어간다.



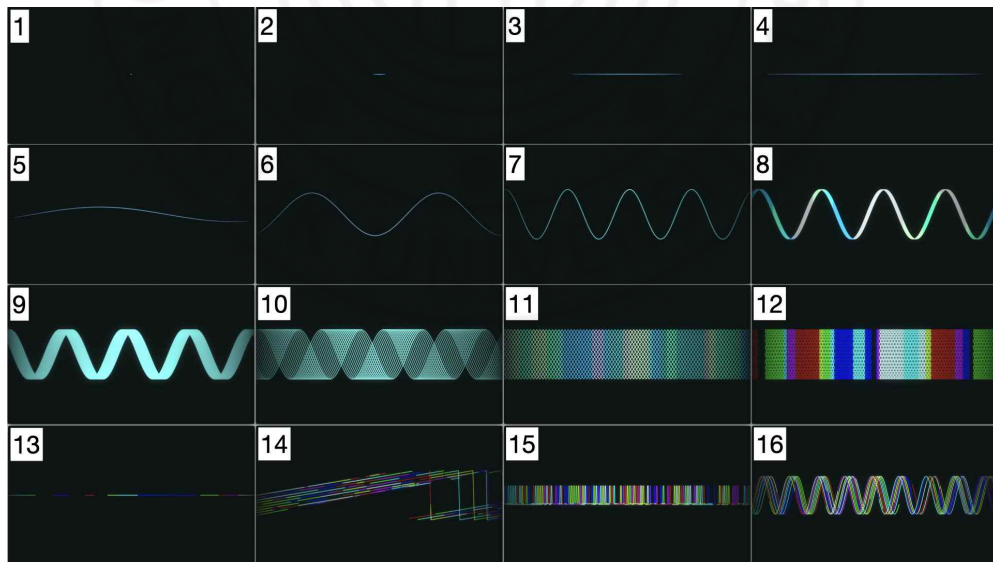
[그림-57] A파트 비주얼의 진행

③ B파트

B파트는 A파트의 끝부분 점이 점차 선으로 변화하는 것으로 시작한다. 1차원 선이 진동하며 2차원의 면으로 변화하는 것을 표현했다.

DIMENSION의 착현 연주에 따라서 시각화된 파형의 진폭과 주기가 변화하고, 테이프음악의 진행에 따라서 위상이 서로 다른 파형들이 추가되고, 악기 리듬에 따라서 색과 파형의 종류가 무작위로 변화한다. 마지막 장면은 C파트로 전환을 위해서 수평선의 모습으로 끝나게 된다. [그림-58]의 1번에서 4번 그림은 A파트의 점에서 전환되는 부분이다. 5번에서 7번은 DIMENSION의 음량에 따라서 진폭, 주기가 변화하는 부분이다. 8번에서 10번은 다른 위상을 가진 파형이 추가되는 부분이다. 11번과 12번은 채도의 차이를 보여주는 부분이다. 13번부터 16번은 무작위로 변화하는 파형의 모습을 보여주는 부분이다.

테이프음악은 B파트의 시작과 함께 A파트의 부드러운 질감의 사운드는 사라지고, 거친 질감의 패드가 리듬을 표현한다. DIMENSION은 착현 연주가 시작되어 풍성하고 넓은 공간감의 사운드가 표현된다. 음악이 진행되며 패드의 박자는 더 작은 단위로 나뉘어 리듬을 연주하며 고조시킨다.

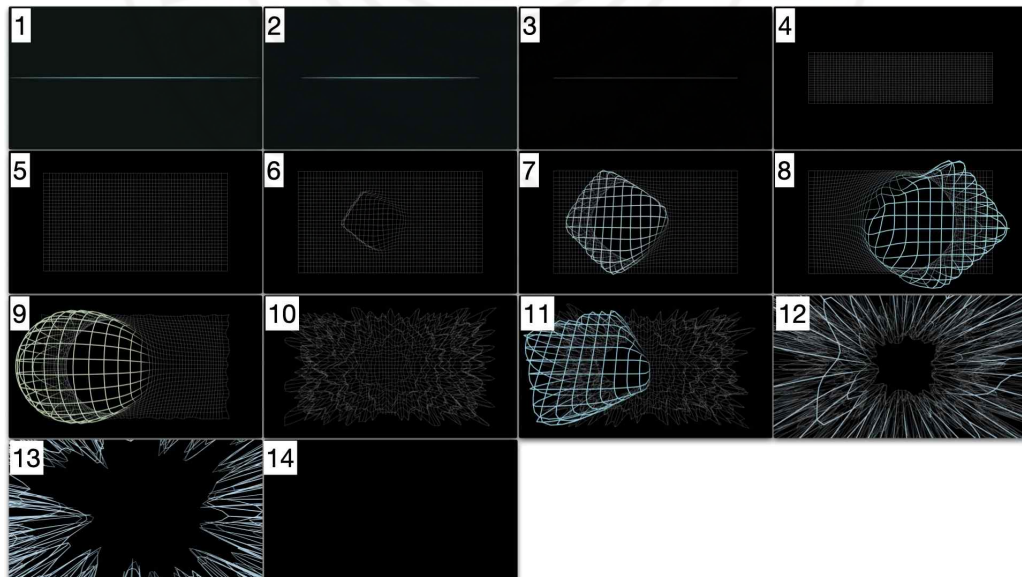


[그림-58] B파트 비주얼의 진행

④ C파트

C파트는 테이프음악과 진행되는 장면이다. B파트 마지막의 수평선에서 그리드가 펼쳐지며 시작된다. 이어서 2차원 면인 그리드를 왜곡시키는 3차원의 입체 도형과, 입체 도형이 그리드를 왜곡시킴에 따라서 악기의 음고와 리듬이 변화한다. 이는 4차원 시공간의 시간 축의 개입을 표현하는 요소이다. [그림-59]의 1번부터 5번은 선에서 그리드로 변화하는 부분이다. 5번부터 9번은 그리드를 왜곡시키는 3차원 도형을 보여주는 장면이다. 10번과 11번은 테이프음악의 노이즈 사운드에 따라서 그리드가 구겨지는 것을 보여주는 부분이다. 12번부터 14번은 D파트로 가기 위해서 그리드와 3차원 도형을 통과해서 들어가는 부분이다.

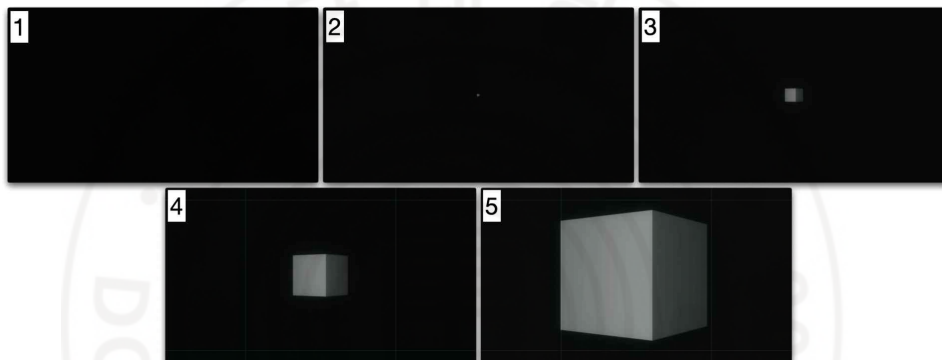
C파트는 테이프음악만으로 진행된다. 시갯바늘 소리와 킁, 스네어 샘플을 사용하여 리듬을 표현하고, 리듬이 잘게 쪼개졌다가 원래대로 돌아오는 것과 베이스 사운드와 리드 사운드의 음정 변화를 비주얼과 인터랙션하였다.



[그림-59] C파트 비주얼의 진행

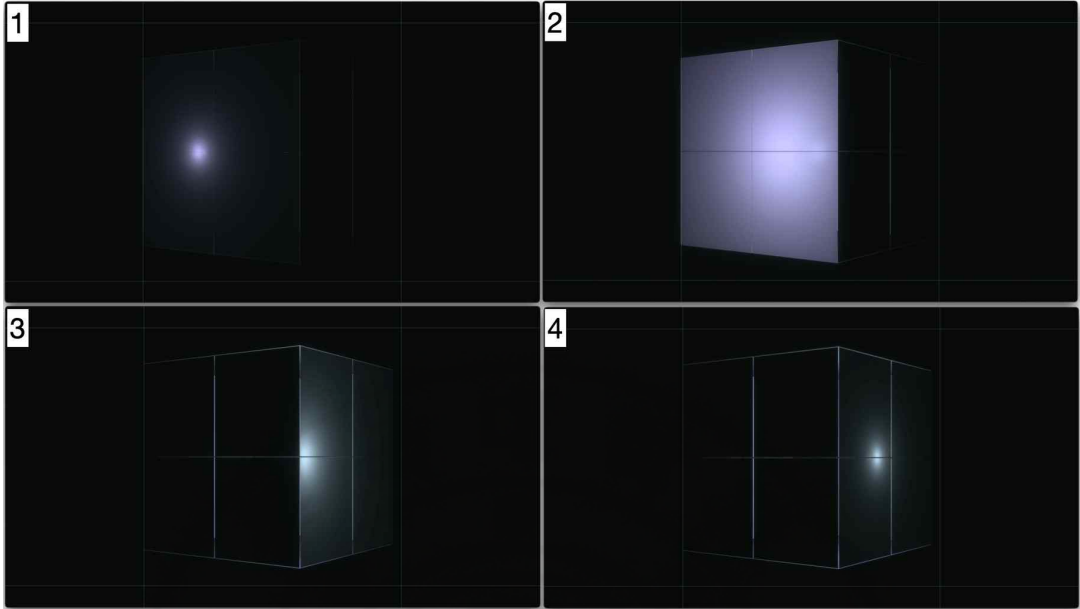
⑤ D파트

D파트는 테이프음악에 따라서 비주얼이 진행된다. 4차원 시공간에 도달하여 다포체를 마주하고, 그 내부를 통과하는 비주얼이다. [그림-60] 해당 파트의 도입부는 C파트에 마지막 장면의 검은 화면에서 빠르게 정육면체가 다가와서 테이프음악의 스네어 소리에 화면 중앙에 멈추는 것으로 시작된다.



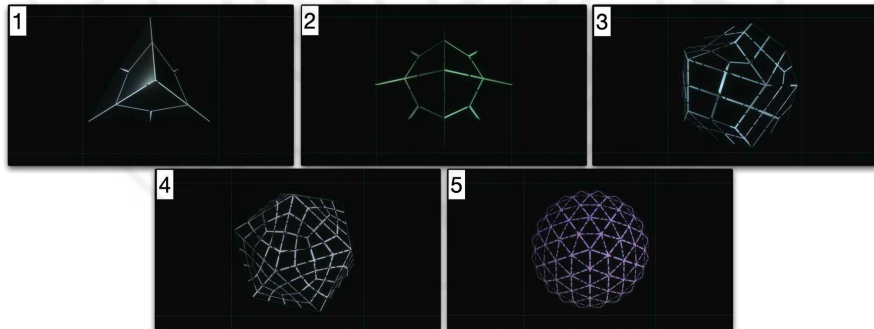
[그림-60] D파트의 도입부

중앙의 3D 오브젝트는 음악이 진행하며 점차 각 면이 나뉘어 간격이 멀어지고, 오브젝트의 형태가 차례대로 바뀐다. 그리고 오브젝트를 비추고 있는 라이트(light)는 오브젝트의 주위를 테이프음악의 리듬에 맞추어 공전한다. 공전하는 빛은 시간의 흐름을 나타내고, 작품의 진행에 따라서 점차 빨라진다. [그림-61]는 빛이 오브젝트 주위를 공전하면서 반사되는 빛의 각도가 변하는 것을 보여주는 그림이다.



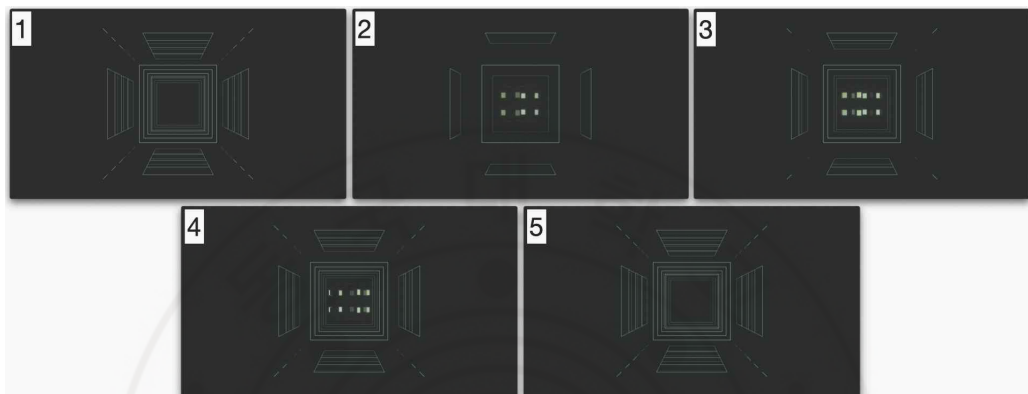
[그림-61] 공전하는 라이트로 인한 빛 반사의 변화

[그림-62]는 오브젝트의 면이 나뉘어 벌어진 모습과, 다양한 형태로 바뀌는 것을 보여주고 있다.



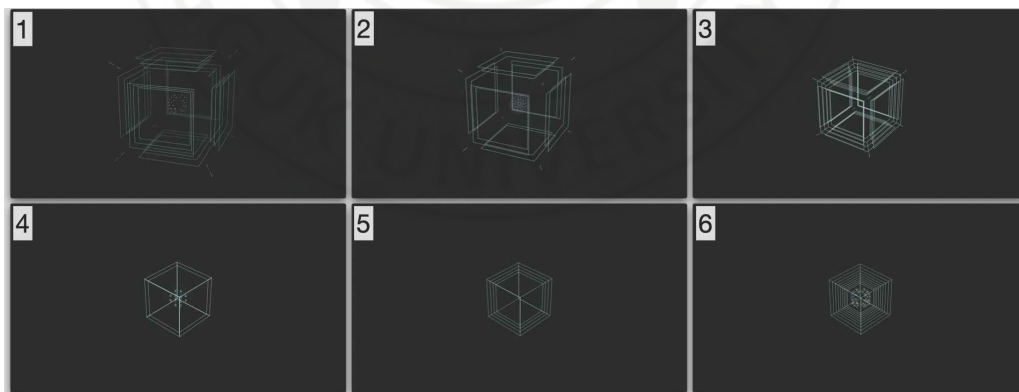
[그림-62] 형태가 바뀌는 3D 오브젝트, 간격이 멀어지는 면

[그림-63] 화면이 축소되며 중앙의 3D 오브젝트는 작아지고, 배경에 있던 분리된 형태의 정육면체가 보여진다. Serum으로 제작한 베이스(bass) 악기 사운드에 맞추어 최외곽 정육면체를 기준으로, 안쪽으로 정육면체가 생성된다.



[그림-63] 다포체의 형태를 갖추기 전 분리된 형태의 장면

[그림-64] 분리된 정육면체는 천천히 회전하며 점차 결합 된다. 이후 테이프음악의 필 인(fill in)⁹¹⁾ 소리에 맞춰 정육면체의 내부에 정육면체가 연속적으로 생성되어 테서랙트(tesseract)⁹²⁾ 형태가 완성된다.

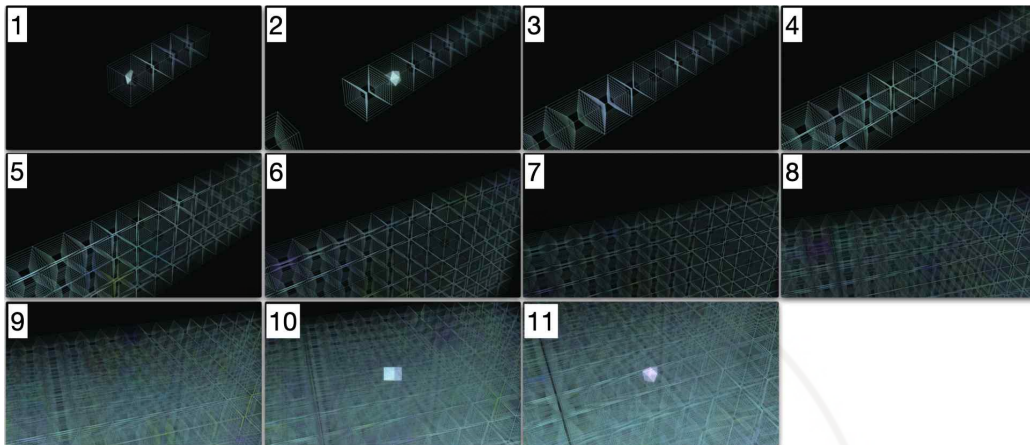


[그림-64] 테서랙트(tesseract)가 완성되는 장면

91) 음악에서 구간 전환이나 빈공간을 채우기 위해서 연주하는 리듬적, 멜로디적 구성

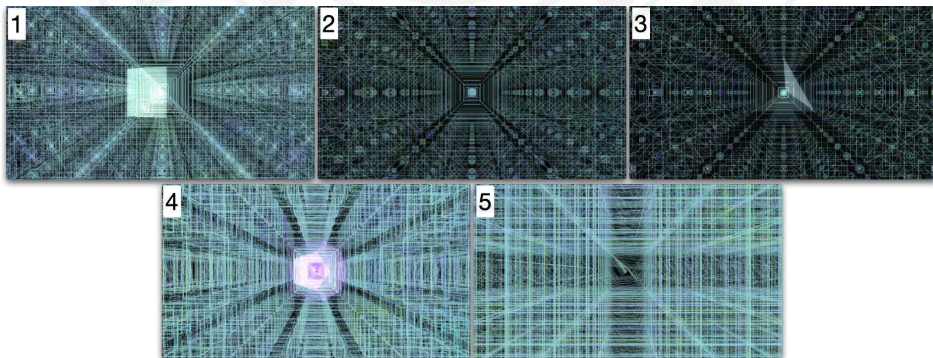
92) 정팔포체

[그림-65] 완성된 테서랙트가 x, y, z축으로 연속되어 이어지며 화면을 가득 채운다. 이 비주얼은 4차원의 시공간을 표현하는 모습이다.



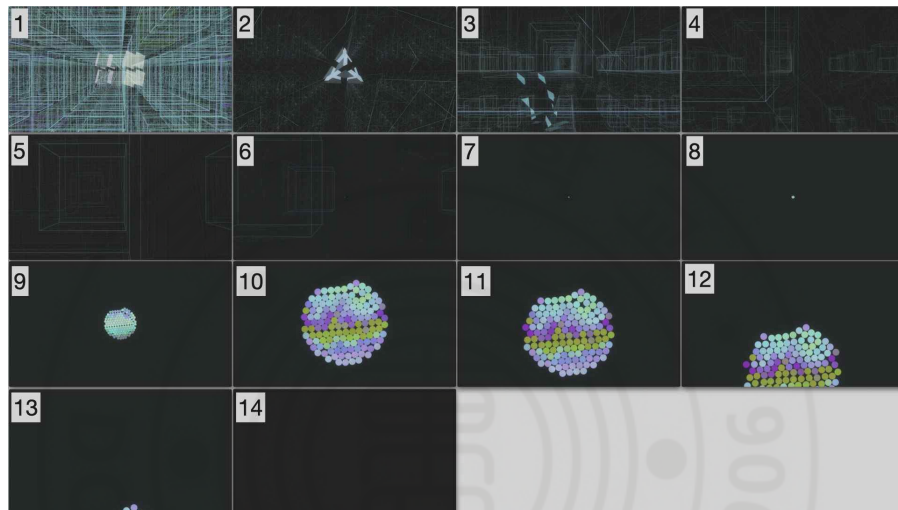
[그림-65] 테서랙트가 연속으로 이어지는 장면

[그림-66] 화면 중앙의 3D 오브젝트가 테서랙트 내부로 진입한다. 테서랙트는 테이프음악의 리듬을 따라서 형태가 변화한다. 리듬이 연주되는 시점에 미디 노트로 트리거를 입력하여, 비주얼을 제어하도록 하였다.



[그림-66] 3D 오브젝트가 테서랙트 내부로 진입하고, 테이프음악에 따라서 테서랙트의 모양이 변화하는 장면

[그림-67] 화면 중앙의 3D 오브젝트는 각 면이 분해되어 사라진다. 테서랙트는 형태를 알아보기 힘들 정도로 모양이 무너지고 점점 사라지는 동시에, A파트의 끝부분의 작은 점이 점차 보이기 시작한다. 작은 점이 점점 다가오는 것으로 내부의 공이 보이고, 음악의 끝과 함께 그릇의 하부가 열리고 모든 공이 떨어지는 것으로 끝난다.



[그림-67] 3D 오브젝트와 테서랙트가 사라지고 A파트의 공이 다시 나타나며 끝나는 장면

D파트의 음악은 웅장한 사운드를 위해서 킥, 스네어, 하이햇 등 타악기 리듬과 리드, 패드, 베이스 등 음정과 화음이 있는 악기들이 모두 사용되었다. 그 밖에 음악의 기승전결을 위한 역재생된 심벌(cymbal) 악기, 상승하는 느낌을 위한 라이즈(rise) 효과, 노이즈 등 다양한 효과들이 사용되었다. 지속적으로 진행되는 느낌의 타악기 리듬과 좌, 우에서 나오는 발현 사운드의 빠르고 화려한 아르페지오(arpeggio)⁹³⁾, 상승하는 DIMENSION 사운드와 테이프음악의 리드 사운드로 절정으로 치닫는 표현을 하였다.

93) 분산 화음

IV. 결론

본 연구는 핸드 트래킹 기술을 이용한 악기 DIMENSION과 실시간 사운드 프로세싱과 비주얼 인터랙션을 통한 멀티미디어 작품 제작에 관한 연구이다. 핸드 트래킹 기술을 통해 연주 방식을 확장된 악기 DIMENSION의 특징을 최대화하여 연주자의 감정 표현에 더 민감하게 반응하는 사운드를 만들고, 그에 인터랙션 되는 비주얼을 이용하여 작품<Tesseract>의 의도를 효과적으로 전달하고자 하였다. 왼손과 핸드 트래킹 센서의 상호작용으로 음고, 음색 등이 제어되었다. 손과 센서의 거리는 악기의 음고를 제어하고, 쥐고 편 상태는 딜레이 효과 제어, 손의 회전 각도는 디튠 효과를 통한 음색 제어 및 화음 제어에 이용되었다.

악기 제작을 위해서 3D 모델링을 통한 설계를 했다. Max를 이용하여 악기의 신호를 처리하고, 소리를 합성하여 악기 사운드를 만들었다. 핸드 트래킹 센서인 Leap Motion으로 트래킹한 데이터는 TouchDesigner에서 분석하고 처리하여 Max로 송신하여 악기 사운드를 제어하는 데에 사용하였다. Logic Pro를 이용하여 테이프음악을 만들고, 미디 데이터를 작성하여 TouchDesigner에서 제작한 비주얼과 음악의 인터랙션을 설계하였다. 시각적인 요소를 더하기 위해서 악기에 아두이노 LED를 장착하고 작품의 비주얼의 진행에 따라서 프레임으로 제어하는 인터랙션을 추가하였다.

작품과 악기를 구상하는 시점에서 생각했던 손동작을 이용한 사운드의 제어 효과는 기대 수준을 만족시켰다. 실제로 연주자의 손동작에 따른 사운드의 실시간 변화는 연주의 몰입도를 높일 수 있었고, 연주를 통해 감정을 표현하는데 더 수월하였다. 악기를 제작하는 과정에서 3D 모델 설계는, 악기 제작의 시행착오를 줄여주었다.

본 연구를 진행하는 중에, 핸드 트래킹 센서인 Leap Motion은 손과 센서의 y축 회전 방향에 따라서 트래킹 데이터의 편차가 발생했다. 편차가 크지 않아서 실제 연주에는 문제가 없었지만, 손동작으로 사운드 제어 시에 약간의 이질감이 있었다. 피에조 픽업을 사용하여 악기의 소리를 발생시키는 것에서는, 노이즈 게이트를 사용하여 의도하지 않은 입력 신호를 방지했으나, 악기 몸체에 강한 물리적 충격이 발생하는 것은 막아내지 못한 부분이 있었다.

추후, 센서와 손의 y축 회전 각도에 따른 트래킹 데이터 출력값에 오프셋을 자동화하는 것이나, Computer Vision 모델의 정확도를 향상시켜서, 편차를 더욱 완화하는 연구가 필요하다. 추가로 완전히 물리적 접촉이 없는 방식의 악기를 사용하여 작품을 연주하는 것에 대한 연구를 진행한다면, 완전히 자유로워진 두 손을 이용한 연주가 가능하게 될 것이다. 이는 연주자의 두 손이 완전히 자유로워 짐으로써, 감정을 표현하는 것에 확장을 기대할 수 있다. 또한 완전히 물리적 접촉이 없기 때문에, 피에조 픽업 등 물리적 신호를 이용하는 것에서 발생했던 노이즈 등의 문제도 해결할 수 있을 것으로 기대한다.

Keyword (검색어): DIMENSION, 인터페이스(interface), 오디오 비주얼(audio-visual), 컴퓨터음악(computer music), 핸드 트래킹(hand tracking), 인터랙티브 멀티미디어 음악(interactive multimedia music), Max, 실시간 사운드 프로세싱(real-time sound processing), TouchDesigner, 아두이노(Arduino), 피지컬 컴퓨팅(physical computing), Visualization

E-mail: kgup97@gmail.com

참 고 문 헌

1. 단행본, 학술지

이관규, 「be sound be visionary TouchDesigner Guide」 (be sound be visionary, 2023)

최성록, 「3D 애니메이션 기법을 활용한 아나몰픽 미디어아트 제작 연구-〈서울환상소경〉중심으로-」 (예술과미디어, 2024)

Mark Ballora 「Essentials of Music Technology」 (Pearson, 2002)

Roger T. Dean 「The Oxford Handbook of Computer Music」 (Oxford University Press, 2009)

James H. McClellan, Ronald W.Schafer, Mark A.yoder 「Signal Processing First」 (Prentice-Hall, 2002)

Miller Puckette 「The Theory and Technique of Electronic Music」 (World Scientific Publishing, 2007)

Sergio Rapuano, Fred J. Harris 「An Introduction to FFT and Time Domain Windows」 (IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2008)

Curtis Roads 「The Computer Music Tutorial」 (The MIT Press, 1996)

2. 참고논문

오이령. 「베이스기타의 실시간 사운드 프로세싱을 이용한 인터랙티브 멀티미디어 작품 제작 연구」 (동국대학교 영상대학원 멀티미디어학과, 2024)

이관규. 「피아노 연주와 무용수의 움직임을 이용한 인터랙티브 멀티미디어 작품 제작 연구」 (동국대학교 영상대학원 멀티미디어학과, 2022)

이동규. 「Interface(INPUTO)를 이용한 인터랙티브 콘텐츠 연구」 (동국대학교 영상대학원 멀티미디어학과, 2011)

이은화. 「플루트의 실시간 사운드 프로세싱을 활용한 인터랙티브 멀티미디어 작품 연구」 (동국대학교 영상대학원 멀티미디어학과, 2022)

임소혁. 「실시간 모션 트래킹에 의한 프로젝션 맵핑과 인터랙티브 멀티미디어 작품 제작 연구」 (동국대학교 영상대학원 멀티미디어학과, 2024)

3. 웹사이트

Max: <https://cycling74.com/>

TouchDesigner: <https://derivative.ca/>

Ultraleap: <https://www.ultraleap.com/>

Abstract

Interactive multimedia producing study
based on recognition of hand's movement
-focuse on Multimedia Art <Tesseract>-

Kim, Yeon Ho

Department of Multimedia
Graduate School of Digital Image and Contents
Dongguk University

This study presents the design and implementation of the DIMENSION, a musical instrument designed to minimize physical contact, through the production process of the interactive multimedia artwork <Tesseract>. DIMENSION combines real-time hand-tracking technology (Leap Motion Controller 2), vibration sensing using piezo pickups, and LED control based on Arduino to enable the interaction of visual and auditory elements.

Through this musical instrument, performers can intuitively control timbre, pitch, and sound effects using only hand gestures, providing an immersive experience for the audience.

<Tesseract> explores the abstract concept of 4D spacetime, expressed visually through points, lines, planes, solid shapes, and polytopes implemented using TouchDesigner. The work also employs TouchDesigner's physics engine (Bullet Solver) to create animations that capture realistic movements and interactions, combined with various visual effects. The auditory elements merge tape music with live performance. While the tape music was produced using Logic Pro, the live performance is based on sounds generated through DIMENSION and designed using Max. In particular, Max was used not only to create plucking and bowing sounds for DIMENSION but also to design and implement various sound effects such as detuning, delay, and reverb. This allows performers to control timbre, pitch, and sound effects in real time, showcasing new possibilities for interaction between performance and sound effects.

DIMENSION is designed in the shape of a triangular prism, aligning with the theme of 4D spacetime, while its LEDs enhance both the performance and visual effects. The LEDs highlight the movement of the strings and the performer's gestures, delivering a more impactful performance and musical transitions to the audience.

This study reimagines traditional musical performance by utilizing a musical instrument designed to minimize physical

contact, creating a new form of audiovisual experience. Furthermore, it expands the potential of multimedia performances by integrating technology and art, offering new directions for interactive multimedia works.



부록: 첨부 DVD

1. Tesseract 공연 영상

2024년 11월 9일 멀티미디어 작품 <Tesseract>의 공연 영상

2. Tesseract 작품 패치

TouchDesigner 패치, DIMENSION에 사용된 Max 패치, Arduino 코드

