



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](#)

석 사 학 위 논 문

스마트폰 센서와 베이스기타를 활용한
실시간 멀티미디어음악 작품 연구
-멀티미디어음악 작품 <Low Tide(썰물)>-

지도교수 김 준

동국대학교 영상대학원 멀티미디어학과

이 지 우

2 0 2 6

석사학위논문

스마트폰 센서와 베이스기타를 활용한
실시간 멀티미디어음악 작품 연구
-멀티미디어음악 작품 <Low Tide(썰물)>-

이 지 우

지도교수 김 준

이 논문을 석사학위 논문으로 제출함

2025 년 12 월

이지우의 음악석사(컴퓨터음악) 학위 논문을 인준함

2026 년 1 월

위원장 정 진 현



위 원 김 정 호



위 원 김 준



동국대학교 영상대학원

목 차

I. 서론	1
1. 연구 배경	1
2. 연구 목적	3
II. 기술 연구	5
1. 사운드 시스템 연구	5
1) 사운드 시스템	5
2) 사운드 프로세싱 연구	6
① additive synthesis	6
② delay	9
③ comb-filter	10
④ reverberation effect	11
⑤ granular synthesis	13
⑥ loop station	15
2. 영상 시스템 연구	17
1) 영상 디자인	17
2) TouchDesigner 영상 제작 방식	18
① GLSL 기반 형태 생성	19
② UV 좌표 변조(perturbation)	23

③ wave 함수 기반 순환 모델	26
3) 영상 작업 과정	28
3. 공연 시스템 구성	29
1) 공연 시스템 설계	29
2) OSC 통신	30
3) 스마트폰 애플리케이션 개발	31
① 애플리케이션 설계	31
② 라이브러리 및 네트워크 구성	33
③ UI 설계	34
④ 추가 기능	36
4) 풋 스위치를 이용한 모드 전환	38
III. 연구 기술의 작품 적용	39
1. 작품 소개	39
2. 작품 구성	40
1) 음악 구성	40
2) 영상 구성	42
3) 무대 구성	44
3. 작품에서의 사운드 및 영상 기술 적용	46
1) A section	46
2) B section	47

3) C section	48
4) A' section	48
5) B' section	49
4. 기대 효과	51
IV. 결론	53
참 고 문 헌	55
ABSTRACT	59
부록-1 : 작품 <Low Tide> 악보	61
부록-2 : 첨부 DVD 설명	64

표 목 차

<표-1> munger ~오브젝트 설명	14
<표-2> karma ~의 상태 파라미터 설명	16
<표-3> GLSL 구분	18
<표-4> 음악 작품 구조	41
<표-5> 영상 구성	43
<표-6> A section에 적용된 사운드 프로세싱 및 영상 프로세싱	46
<표-7> B section에 적용된 사운드 프로세싱 및 영상 프로세싱	47
<표-8> C section에 적용된 사운드 프로세싱 및 영상 프로세싱	48
<표-9> A' section에 적용된 사운드 프로세싱 및 영상 프로세싱	48
<표-10> B' section에 적용된 사운드 프로세싱 및 영상 프로세싱	49

그림 목 차

[그림-1] 5현 베이스기타	2
[그림-2] 5현 베이스기타의 음역대	2
[그림-3] 실시간 입력 신호로부터 조절되는 하나의 배음 서브 패치	7
[그림-4] additive synthesis 패치	8
[그림-5] delay 패치	9
[그림-6] α (피드백 계수)에 따른 comb-filter 응답 그래프	10
[그림-7] JCRcv 신호 흐름도	12
[그림-8] JC_rev~ 패치	12
[그림-9] JC_rev~ 데이터 수신 패치	13
[그림-10] munger~ 오브젝트 패치	14
[그림-11] loop station 패치 구성	16
[그림-12] GLSL 파라미터	18
[그림-13] 원 형태 생성 코드	20
[그림-14] 원 형태 코드 적용 결과	21
[그림-15] 선 형태 생성 코드	22
[그림-16] 선 형태 코드 적용 결과	22
[그림-17] UV좌표 변조 코드	24
[그림-18] UV좌표 변조 코드 적용 결과	25

[그림-19] wave함수 코드	27
[그림-20] wave함수 적용	27
[그림-21] 영상 후처리 작업	29
[그림-22] 공연 시스템 설계도	30
[그림-23] 스마트폰 애플리케이션 제작 플랫폼	31
[그림-24] 애플리케이션 개발 초기 세팅	34
[그림-25] UI 함수식	35
[그림-26] UI 함수식 결과	36
[그림-27] 터치 데이터 전송 및 실행	37
[그림-28] 풋 스위치 맵핑 설계	38
[그림-29] 작품 <Low Tide>의 공연 이미지	39
[그림-30] 무대 구성	44
[그림-31] 스마트폰과 풋 스위치	45
[그림-32] A section의 영상 변화	46
[그림-33] B section의 영상 변화	47
[그림-34] A' section의 영상 변화	49
[그림-35] B' section의 영상 변화	50

I. 서론

1. 연구 배경

오늘날 우리는 누구나 스마트폰을 일상적으로 사용하는 환경 속에 살고 있으며, 스마트폰은 통신 기기에서 그치는 전자장비가 아니라 다양한 센서와 연산 능력을 갖춘 소형 컴퓨팅 플랫폼으로 기능한다. 스마트폰에 내장된 센서는 사용자의 움직임과 제스처를 실시간으로 감지할 수 있어, 새로운 형태의 인터페이스(interface)를 구성할 수 있는 잠재력을 지니고 있다. 이러한 시대적 조건은 본 연구가 추구하는 ‘연주자의 신체 동작을 기반으로 한 실시간 반응형 시스템’과 맞닿아 있으며, 별도의 전용 장비 없이도 누구나 접근할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 스마트폰 센서를 소리와 영상의 실시간 변화를 제공하는 이펙터(effector)이자 데이터 송신 장비로 다루었다. 이를 인풋 소스(input source)¹⁾가 되는 전자 악기의 음향 신호와 결합한 상호작용 구조를 구축하고자 하였다.

인터랙티브 멀티미디어(interactive multimedia) 작품에서 입력 신호는 시각적, 음향적 반응의 구조를 형성하는 핵심 요소이다. 본 연구에서는 베이스기타(bass guitar)²⁾를 주요 악기로 선정하였다. 베이스기타는 저주파대의 안정된 파형, 명확한 어택 특성, 그리고 연주기법에 따른 뚜렷한 에너지 변화를 갖고 있어 실시간 분석 및 디지털 프로세싱(digital processing)에 적합한 악기이다. 기본적으로 4현 구성의 형태가 보편적이거나 현대의 연주자들은 보다 확장된 음역과 다양한 표현을 위해 5현 또는 6

1) 시스템이 이후의 분석·처리·변환 과정을 수행하기 위해 가장 먼저 받아들이는 원천적 신호이다.

2) 콘트라베이스의 부피 문제를 해결하기 위해 개발된 전자 현악기다.

현 모델을 널리 사용하고 있다.



[그림-1] 5현 베이스기타³⁾

본 연구에서도 5현 베이스기타를 인풋 신호의 기반 악기로 사용하여, 저음역의 확장인 다섯 번째 현(B-string)⁴⁾에서 생성되는 주파수(frequency)⁵⁾ 정보를 시각·음향 매핑에 적극 활용하였다. 이는 일반적인 4현 베이스에서 얻기 어려운 저역대의 안정적 에너지와 표현 폭을 제공하며, 실시간 인터랙션의 반응성을 높이는 데 기여한다.



[그림-2] 5현 베이스기타의 음역대

3) <https://kr.yamaha.com>

4) 5현 베이스의 5번째 줄로서 최저음이 연주되는 줄이다.

5) 1초 동안 반복되는 진동의 횟수를 의미하며 단위는 헤르츠(Hz)를 사용한다.

음악적 역할 측면에서 베이스기타는 리듬 악기와 멜로디 악기 사이의 공간을 채우며 음악적 기반을 구축하는 역할을 한다. 드럼과 결합하여 리듬을 형성하며, 곡 전체의 진행 방향과 안정감을 제공한다. 음향적 특징 또한 연주기법에 따라 명확한 차이를 보이는데, 예를 들어 핑거스타일(finger style)⁶⁾의 핵심 주파수는 약 125Hz에 집중되고, 하모닉스(harmonics)⁷⁾ 주법을 사용하면 2.5kHz~3kHz 대역이 강조되는 등 주법별로 뚜렷한 스펙트럼 패턴을 지닌다. 이러한 특성은 FFT(Fast Fourier Transform)⁸⁾ 분석을 통해 기법 변화 구간을 명확히 분리해내는 데 용이하며, 시각적 반응의 트리거로 활용하기에 적합하다.

2. 연구 목적

스마트폰의 보편화는 기술 환경의 변화에 그치지 않는다. 사람들은 스마트폰을 신체의 연장처럼 다루며 일상의 인지적, 감각적 흐름을 그 안에 통합하여 사용한다. 스마트폰은 더 이상 외부 장치가 아니라 사용자의 신체와 거의 동일한 타이밍으로 반응하며 움직임을 포착하는 상시적 감각 기관으로 기능한다. 즉, 스마트폰은 다양한 센서를 갖춘 장치라는 점보다 사용자의 몸에 가장 자연스럽게 밀착해 있는 디지털 장치라는 점에서 인터랙션 매체로 독특한 위치를 지닌다. 이러한 조건에서 스마트폰을 인터페이스로 활용하는 것은 단순한 편의의 문제가 아니라 현대의 신체 경험이 기술적 장치를 어떻게 흡수하고 있는지를 예술적으로 검증하는 행위에 가깝다. 기존의 모션 캡처 장비⁹⁾는 높은 정밀도를 제공하지만

6) 엄지손가락을 픽업이나 지지대에 놓고 검지와 중지를 움직이며 현을 튕기는 주법

7) 현을 특정 분할 지점에 가볍게 접촉하여 배음만을 울리게 하는 연주 기법

8) 시간 기반의 신호를 주파수 기반으로 변환하는 데 사용되는 알고리즘

9) 사람이나 사물의 움직임을 카메라로 추적해 디지털 데이터로 변환하는 장치

신체와 카메라 사이에 분명한 기구적 간극을 남긴 반면 스마트폰은 그 간극을 최소화하며 연주자의 손동작, 손목의 미세한 회전, 악기 연주 시 발생하는 리듬적 흔들림까지 자연스럽게 포착한다. 본 연구는 이러한 일상화된 기술과 연주자의 신체가 결합하는 지점이 멀티미디어 퍼포먼스의 표현 범위를 어떻게 확장시키는지 검증하는 데 목적이 있다. 신체 동작 기반 데이터는 베이스기타의 저음역대가 지닌 파동적 소리 특성을 좌우 할 때, 더욱 뚜렷한 조형적, 음향적 의미를 형성한다. 베이스기타의 저주파는 파장이 길고 공간을 밀어내듯 천천히 확산되는 물리적 특성을 보이는데 이는 물결이나 파도가 중심에서 바깥으로 에너지가 퍼져 나가는 방식과 유사하다. 즉, 저음의 확산 방식 자체가 파도의 운동과 구조적으로 흡사하다. 파동의 특성은 시각적으로는 중심에서 확산되는 원의 형태로 표현하기에 가장 적합하다고 판단하였다. 원형 이미지를 주요 시각 요소로 채택한 이유는 저주파 에너지가 공간에 확산되는 방식과 스마트폰 기반 인터페이스가 만들어내는 연속적 움직임의 흐름을 시각적으로 압축하는 구조적 장치이기 때문이다.

스마트폰을 통한 신체 데이터, 베이스기타의 저주파 진동, 그리고 원형 시각 요소는 각각 다른 영역의 정보처럼 보이지만 에너지의 생성, 전달, 확산이라는 동일한 파동적 원리를 공유한다. 본 연구는 이 세 가지를 하나의 인터랙티브 구조 안에서 연결함으로써 연주자의 신체로부터 발생한 움직임이 음향적 파동으로 변환되고 다시 시각적 파동 구조로 표현되는 과정을 실시간으로 드러내는 퍼포먼스 환경을 구축하고자 한다.

II. 기술 연구

1. 사운드 시스템 연구

1) 사운드 시스템

본 논문에서 다루는 멀티미디어음악 작품 <Low Tide>의 사운드 시스템은 베이스기타의 라이브 연주를 기반으로 실시간 음향 효과를 구성하는 형태로 설계되었다. 베이스기타에서 발생한 전기 신호는 오디오 인터페이스를 거쳐 컴퓨터로 입력되며, 입력된 신호는 Ableton Live¹⁰⁾ 환경 내에서 처리된다. Max¹¹⁾로 제작한 음향 패치(patch)¹²⁾는 Max for Live¹³⁾를 통해 스마트폰 센싱으로 조절되며, Ableton Live의 aux track¹⁴⁾에 삽입하여 실시간 변조를 가능하게 하였다. 베이스기타 트랙은 send¹⁵⁾방식으로 aux track으로 신호를 분배하고, 각 채널은 additive synth, delay, comb-filter, reverberation effect, granular synthesis 등의 패치를 통해

10) 전문적인 음악 제작 및 라이브 공연을 위한 디지털 오디오 워크스테이션(Digital Audio Workstation, DAW)이다.

11) Cycling '74에서 개발한 그래픽 프로그래밍 환경으로, 오디오, 비디오, 미디어 아트, 인터랙티브 설치 작품 등 다양한 멀티미디어 프로젝트를 개발할 수 있는 도구이다.

12) 여러 오브젝트를 선으로 연결해 하나의 기능을 구성한 Max의 작업 단위를 말한다.

13) Ableton Live와 통합되어 사용되는 확장 툴킷(toolkit)이다. Max 환경을 기반으로 하며, 다양한 오디오 및 미디어 기능을 구현할 수 있다.

14) 다른 트랙의 신호를 받아 효과나 믹스를 따로 처리할 수 있게 해주는 보내기용 보조 트랙이다.

15) 트랙의 일부 신호를 외부 버스나 aux track으로 보내 별도로 효과를 처리하는 방식이다.

개별적으로 변형된다. 변형된 오디오 신호는 다시 믹서를 거쳐 스피커로 출력된다. 이러한 구조는 연주 상황의 다이내믹에 즉각적으로 반응할 수 있도록 설계되었으며, 특정 음향효과의 강도와 성격을 실시간으로 조절할 수 있는 유연성을 제공한다.

2) 사운드 프로세싱 연구

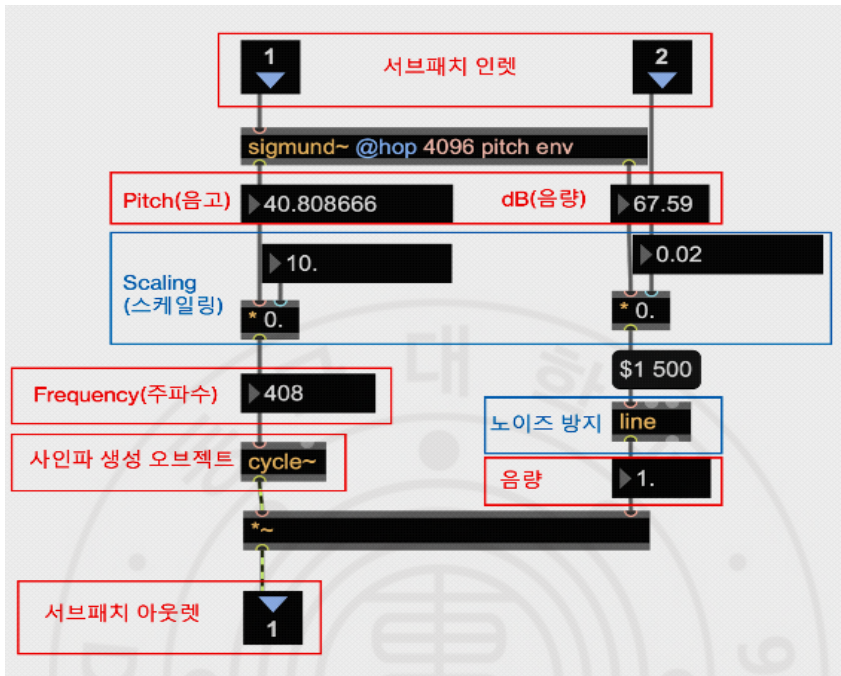
① additive synthesis

additive synthesis(가산합성)는 복잡한 음색을 구성하는 여러 개의 사인파¹⁶⁾ 배음(partial)¹⁷⁾을 독립적으로 생성하고 더하여 새로운 스펙트럼을 형성하는 합성 방식이다. 이 기법은 자연 배음열(natural harmonics)¹⁸⁾ 구조를 모사하거나 기존 악기에서는 표현하기 어려운 미세한 음색 변화를 구현하는 데 적합하다. 각 배음의 진폭, 주파수, 위상을 개별적으로 제어할 수 있어, 시간에 따라 점진적으로 변화하는 음향적 텍스처를 제작할 수 있다는 특징을 지닌다. Max 환경에서는 이러한 additive synthesis 구조를 여러 오브젝트를 연결하여 구성된 패치 형태로 구현한다. 패치는 신호 흐름과 연산 과정을 시각적으로 배치한 작업 단위로, 각 기능 모듈을 블록처럼 조합해 하나의 음향 시스템을 형성한다. 따라서 사용자는 각 배음 생성기, 제어 신호, 합성 모듈 등을 패치 내부에 구조화하여 복잡한 음향 변화를 직관적으로 설계할 수 있다.

16) 한 개 주파수로만 이루어진 파형이다.

17) 한 소리를 이루는 개별 주파수 요소들을 말한다.

18) 현이나 관의 물리적 진동 구조에서 발생하는 고유한 정수배 진동수들의 계열로, 기본음 위에 자연적으로 형성되는 배음들의 체계를 의미한다.



[그림-3] 실시간 입력 신호로부터 조절되는 하나의 배음 서브 패치

[그림-3]은 입력 신호의 미디(MIDI)¹⁹⁾ 신호 체계 기반의 음고와 음량값을 **sigmund~**오브젝트를 통해 입력 신호 값에 따라 **cycle~**의 음고와 음량값이 변하는 하나의 배음 구조를 구현한 서브패치²⁰⁾이다. **sigmund~**의 '@hop 4096 pitch env'는 4096 샘플²¹⁾ 단위로 음고 및 음량을 FFT로 분석해 출력하도록 설정한 **sigmund~**의 모드 지정이다. **sigmund~**는 입력 신호 값을 피치와 데시벨로 나누어 디텍팅(detecting) 할 수 있게 <밀러 푸켓>(Miller Puckette, 1959-)²²⁾에 의해 개발된 오브젝트이다.

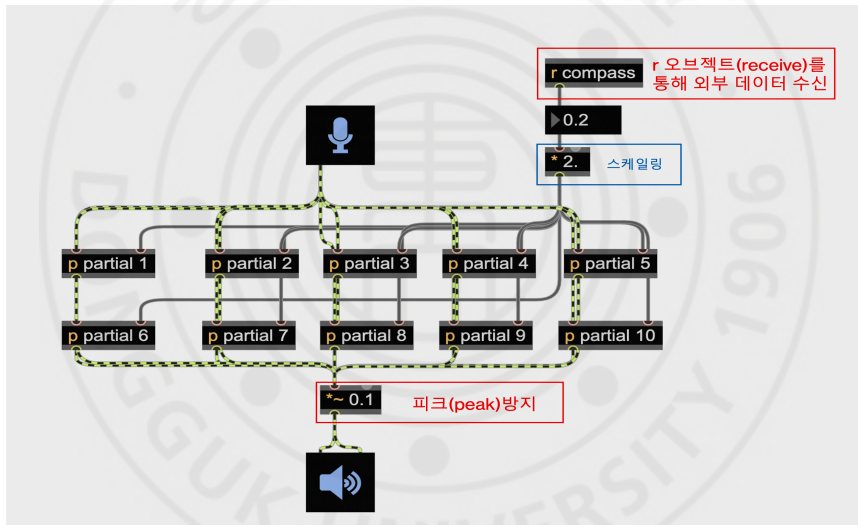
19) 'Musical Instrument Digital Interface'의 약어로 연주 정보를 디지털 신호로 주고받는 음악 통신 규격이다.

20) 복잡한 패치를 기능 단위로 묶어 내부에 캡슐화하여 사용하는 패치 내의 하위 패치 구조

21) 원본 오디오 신호를 아주 짧은 단위로 잘라낸 미세한 조각을 의미한다.

cycle~에서의 활용을 위해 음고와 음량값에서 주파수와 앰프값으로 스케일링(*scaling*)²³⁾이 되었다.

[그림-4]는 [그림-3]의 배음 서브패치로 구성된 additive synthesis 패치이다. 각각의 서브 패치가 입력 신호의 음량 값에 따라 주파수가 변화하고 외부 컨트롤러 데이터값에 따라 음량이 변화하는 구조로 작동한다. 하나의 배음 구조를 **p**오브젝트, 즉 서브패치에 넣어 10개의 배음을 구현하고 이는 새로운 음색을 구성하는 요소가 되며 최초 목표했던 새로운 베이스기타 음색 프로세싱의 주요 음향효과로 기대한다.



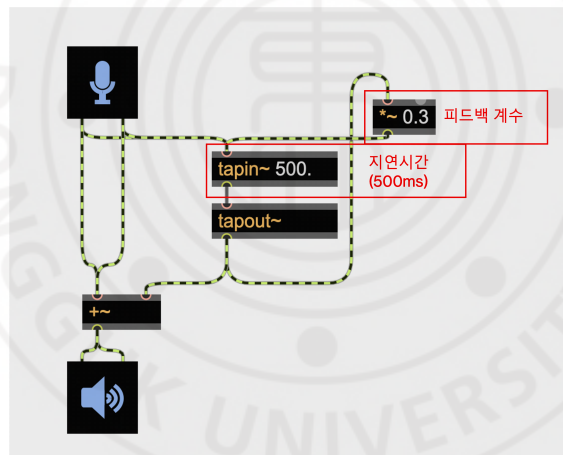
[그림-4] additive synthesis 패치

22) 프랑스 IRCAM에서 그래픽 기반 실시간 오디오 프로그래밍 환경을 개척하며 Max(1986)를 설계한 미국의 대표적 컴퓨터음악 연구자이다.

23) 입력된 값의 범위를 비례적으로 줄이거나 늘려 원하는 출력 범위로 변환하는 과정이다.

② delay

delay(딜레이)는 입력 신호를 일정 시간 지연시켜 원음과 반복음이 겹쳐지는 구조를 만드는 음향효과로, 잔향감, 반사음, 리듬적 패턴 형성에 널리 활용된다. 지연 시간(delay time)²⁴⁾과 피드백(feedback)²⁵⁾을 조절하여 공간의 크기, 반복의 밀도, 반사음의 성격 등을 다양하게 설정할 수 있다. 이러한 특성은 음악적 공간감뿐 아니라 시간적 중첩을 표현하는 데에도 유용하다. Max 환경에서 **tapin~** 오브젝트, **tapout~** 오브젝트는 딜레이 신호를 만드는 기본이 되는 오브젝트이다. 입력 신호가 버퍼(buffer)²⁶⁾ 메모리에 저장되었다가 지정된 시간만큼 신호를 지연시켜 재생하는 방식으로 구현된다.



[그림-5] delay 패치

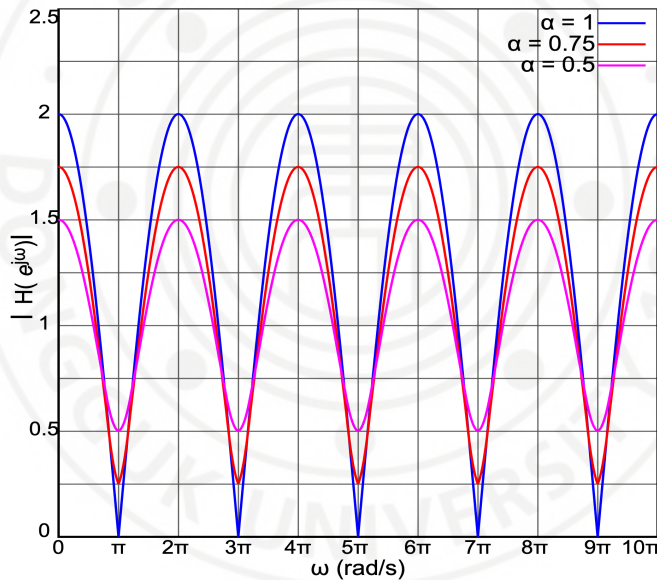
24) 입력 신호가 지연되기까지의 시간을 설정하는 파라미터이다.

25) 처리된 신호를 다시 입력으로 순환시켜 반복 횟수와 잔향감을 결정하는 비율이다.

26) 입력 신호를 짧게 저장해 두었다가 지연 후 재생하기 위해 사용하는 임시 저장 공간이다.

③ comb-filter

comb-filter(콤필터)는 입력 신호와 지연된 신호가 상호 간섭하여 특정 주파수에서 반복적인 상쇄, 강조 패턴을 형성하는 필터로, 스펙트럼이 빗(comb) 모양 형태를 띠는 것이 특징이다. 지연 시간에 따라 공명대(resonant peaks)²⁷⁾와 감쇠대(notches)²⁸⁾의 간격이 결정되며, 이러한 구조적 특성은 고주파 성분이 날카롭게 강조되고 반사성이 커지는 금속성 음색을 비롯해 공명성²⁹⁾, 간섭 기반의 독특한 음향 질감을 형성하는 데 기여한다.



[그림-6] α (피드백 계수)에 따른 comb-filter 응답 그래프³⁰⁾

27) 특정 주파수에서 에너지가 집중되어 소리가 특히 크게 강조되는 지점이다.

28) 특정 주파수가 선택적으로 약화되거나 제거되어 소리가 움푹 깎여 들리는 지점이다.

29) 특정 주파수에서 에너지가 집중되어 소리가 특히 크게 울리거나 두드러지게 들리는 음향적 특성이다.

30) <https://commons.wikimedia.org>

④ reverberation effect

reverberation effect(반향 효과)는 실제 공간에서 발생하는 초기 반사음과 잔향음을 모델링하여, 사운드에 공간적 깊이와 크기를 부여하는 음향 효과이다. 반향의 크기(size)³¹⁾, 잔향 시간(decay)³²⁾, 초기 반사음(early reflections)³³⁾ 등의 파라미터를 통해 다양한 공간의 환경적 특성을 구현할 수 있다. [그림-7]은 일반적인 환경 모사용 알고리즘 리버브가 아닌 delay, comb-filter, all-pass filter(올패스 필터)³⁴⁾의 조합에 기반하여 구성된 <존 차우닝>(John M. Chowning, 1934-)³⁵⁾의 알고리즘 리버브인 J CRev의 신호 흐름도이다. J CRev는 올패스 필터를 통한 초기 반사 성분의 확산과, 상이한 길이의 피드백 콤파터³⁶⁾ 병렬 배치를 통한 잔향 생성, 그리고 출력 신호의 상쇄를 최소화하기 위한 혼합 매트릭스(mixing matrix)³⁷⁾로 구성되는 방식이 특징이다.

31) 가상의 공간 규모를 설정하여 잔향의 확산감과 넓이를 결정하는 파라미터이다.

32) 소리가 사라진 후 음압 레벨이 초기 값에서 60dB(데시벨)만큼 감소하는 데 걸리는 시간이다.

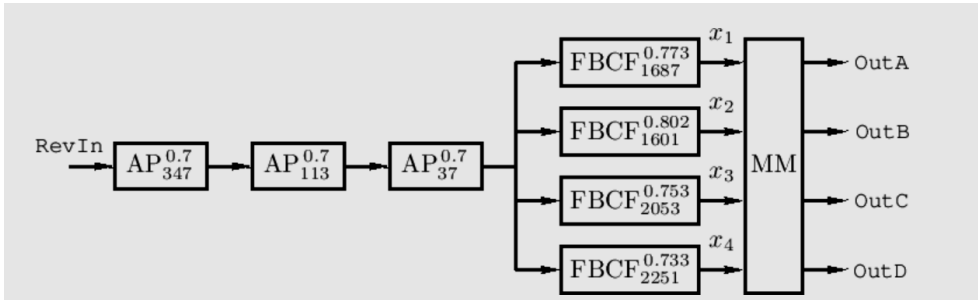
33) 바닥이나 천장에 처음 부딪혀 돌아오는 반사 패턴으로, 공간의 형태와 재질감을 초기 단계에서 인지하게 만드는 요소이다.

34) 모든 주파수를 동일하게 통과시키되 주파수별 위상만 변화시켜 특유의 시간적·공간적 색채를 만드는 필터이다.

35) 미국의 작곡가이자 컴퓨터 음악 선구자이다.

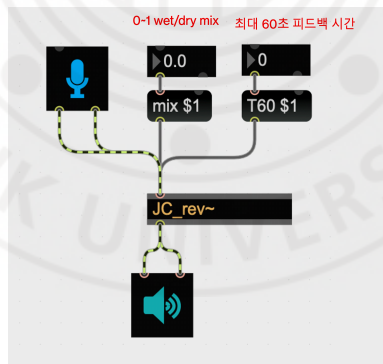
36) 출력 신호가 다시 입력으로 순환되는 구조로 특정 주파수에 주기적 공명·노치 패턴을 만들며, 단순 콤파터보다 훨씬 강한 공명과 지속적인 주파수 구조를 형성한다.

37) 여러 입력 신호를 다양한 비율로 조합해 각 출력으로 분배하는 다채널 신호 혼합 구조이다.



[그림-7] JCRev 신호 흐름도³⁸⁾

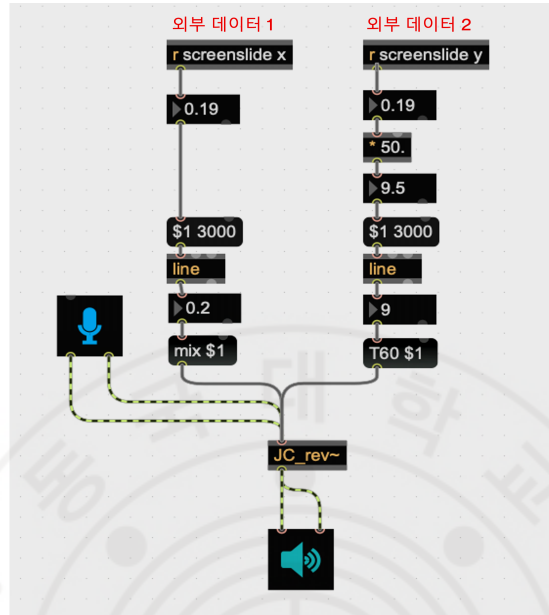
[그림-8]은 Max 환경에서 JCRev를 구현한 **JC_rev~** 오브젝트의 활용이다. 최대 약 60초까지 확장 가능한 피드백 계수와 wet/dry³⁹⁾ 비율 조정이 가능하며, 이를 통해 comb-filter의 금속성 스펙트럼 특성과 잔향의 공간적 확산을 동시에 확보한다. 위 두 개의 파라미터는 외부에서 데이터 수신을 통한 제어가 가능하도록 [그림-9]와 같이 설계하였다. 이러한 구조적 특성은 저음역 악기에서 일반적으로 나타나는 배음 성분 부족 문제를 보완하고, 결과적으로 더 높은 음색적 복잡성을 형성하는 데 기여한다.



[그림-8] **JC_rev~** 패치

38) https://ccrma.stanford.edu/~jos/pasp/Schroeder_Reverberators.html

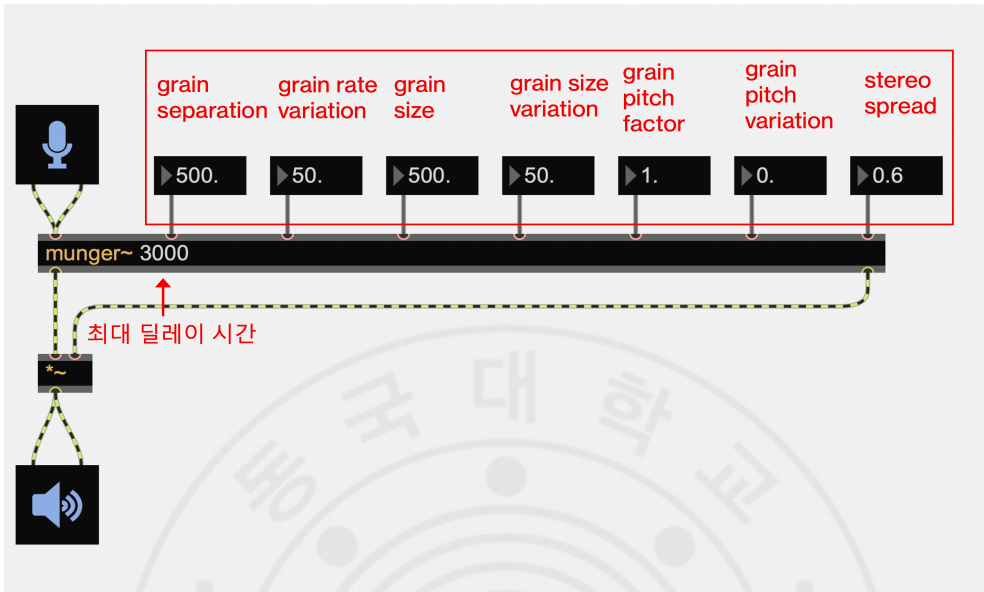
39) 이펙트가 걸린 소리(wet)와 원래 소리(dry)의 비율을 조절하는 개념이다.



[그림-9] JC_rev~ 데이터 수신 패치

⑤ granular synthesis

granular synthesis(그레놀러 합성)는 음향 신호를 매우 짧은 단위의 grain(알갱이)로 분할하고, 이를 시간적으로 재배열하여 새로운 음향 텍스처를 생성하는 샘플 합성 방식이다. grain의 크기(size), 밀도(density), 무작위성(randomization) 등의 파라미터를 통해 파형의 확산, 끊김, 입자화 등 다양한 음향적 변형을 만들 수 있다. [그림-10]의 **munger~** 오브젝트는 granular synthesis를 구현하는 오브젝트이고, 두 번째부터 여덟 번째 인렛으로 오브젝트의 동작을 위한 파라미터 값을 받는다. <표-1>을 통해서 각 파라미터가 맡는 역할을 설명하였다.



[그림-10] **munger~** 오브젝트 패치

<표-1> **munger~** 오브젝트 설명

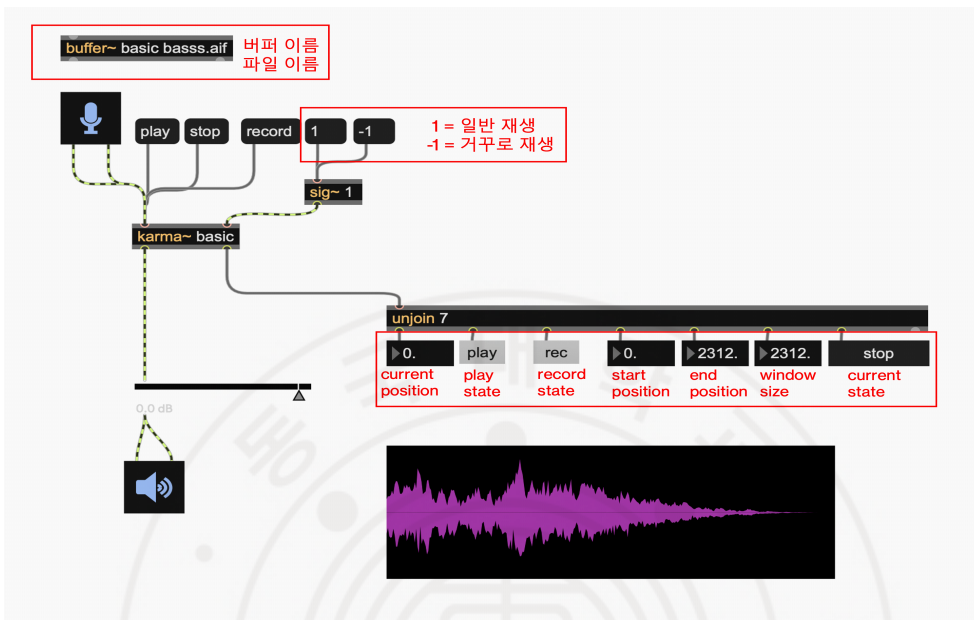
grain separation	샘플의 간격
grain rate variation	샘플 간격의 변화
grain size	샘플의 크기
grain size variation	샘플 크기의 변화
grain pitch factor	음정의 높낮이
grain pitch variation	음정의 변화
stereo spread	좌우 스테레오 폭 조절

⑥ loop station

loop station(루프 스테이션)은 연주자가 생성한 음향 구간을 실시간으로 반복 및 중첩하여 다층 구조를 형성하는 장치이다. 각 루프는 독립된 입력 신호로 녹음되거나 하나의 파형으로 변형 및 재생되며, 루프의 길이, 수, 중첩 방식에 따라 리듬, 선율, 화성적 구조를 확장할 수 있다. 실시간 반복 기반 음악 구조, 즉흥적 패턴 형성, 다성적 구성 등을 형성하는 데 널리 활용된다. 해당 시스템은 입력된 오디오 신호를 일정 길이의 메모리 공간에 실시간으로 기록하는 구조로 구현된다. 연주 중 유입되는 신호는 설정된 시작 지점부터 연속적으로 저장되며, 녹음 구간이 종료된 이후에는 동일한 영역을 반복 재생함으로써 루프가 형성된다. 이후 입력되는 신호는 기존 내용 위에 중첩되거나 별도의 구간으로 추가 저장될 수 있어, 시간적으로 겹치는 다층적 음향 구조를 유연하게 운용할 수 있다. [그림-11]은 이러한 루프 기반 구조를 구현하기 위해 구성된 loop station 패치의 전체 구성도이다. **karma~**오브젝트⁴⁰⁾는 버퍼에 저장한 오디오 파형을 실시간으로 운용할 수 있게 하며, **karma~**오브젝트에서 나온 데이터를 **unjoin~**오브젝트⁴¹⁾를 통해 분리하여 리스트화 하였다. 각 아웃렛이 나타내는 역할은 아래 <표-2>로 정리하였다.

40) <로드리고 코스탄조>(Rodrigo Costanzo)가 설계한 loop station 전용 오디오 처리 오브젝트이다.

41) 리스트나 결합된 데이터를 여러 개의 개별 값으로 분리해 각각의 아웃렛으로 출력하는 Max 오브젝트이다.



[그림-11] loop station 패치 구성

<표-2> karma~의 상태 파라미터 설명

current position	현재 재생 위치(버퍼 내 실시간 위치)
play state	재생 중인지 여부(재생/정지 상태)
record state	녹음 상태(녹음/정지)
start position	재생 시작 지점
end position	재생 종료 지점
window size	버퍼 구간의 길이
current state	현재 상태(녹음/중첩/재생/정지)

2. 영상 시스템 연구

1) 영상 디자인

본 절에서는 작품 <Low Tide>의 영상 구성에 앞서, 어떤 시각적 접근 방식을 선택했는지에 대한 개요를 서술한다. 일반적인 파도의 흐름을 직접적으로 묘사하거나 물리 기반으로 시뮬레이션하기보다는, 파도의 순환성을 추상적으로 표현할 수 있는 영상을 탐색하였다. 이 과정에서 푸른 계열의 원형 구조, 화면을 가로지르는 막대기 형태, 입자 기반의 흐름과 같은 기본 도형들이 파도와 유사한 순환 이미지를 효과적으로 전달할 수 있음을 확인하였다.

시각적 표현을 구현하기 위해 여러 실시간 제작 소프트웨어를 검토하였으며, 특히 TouchDesigner⁴²⁾는 GLSL 셰이더⁴³⁾ 기반의 프로그래밍⁴⁴⁾을 지원하여, 시간, 속도, 위상 변화와 같은 파라미터를 정교하게 제어할 수 있다는 장점이 있었다. Resolume⁴⁵⁾이나 다른 범용 비주얼 소프트웨어와 비교했을 때, TouchDesigner는 수학적 계산과 실시간 렌더링을 결합해 추상적 파형을 만들기에 적합하였으며, 도형 기반 구조를 유연하게 변형하거나 조합할 수 있는 환경을 제공하였다. 이에 따라 본 연구에서는 TouchDesigner를 주요 제작 도구로 선정하여 영상의 기본 구조와 움직임을 설계하였다.

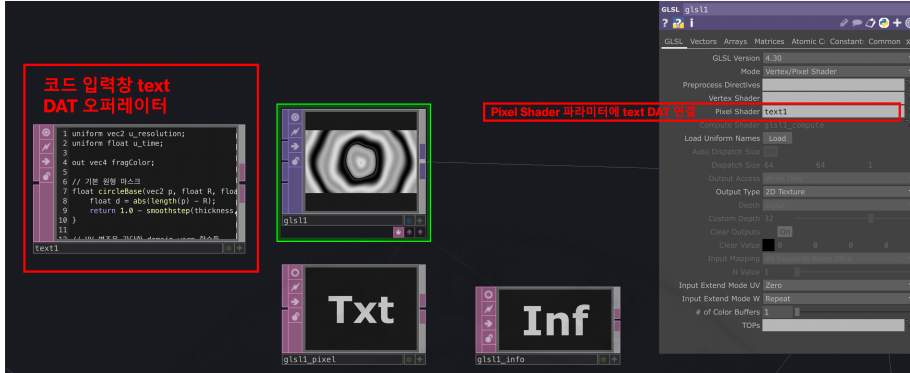
42) 노드 기반 실시간 비주얼 프로그래밍 도구로, 오디오·영상 신호를 이용한 인터랙티브 그래픽 구현에 사용된다.

43) OpenGL Shading Language의 약어로 GPU로 실행되는 셰이더를 작성하기 위한 C 언어 기반의 그래픽스 프로그래밍 언어이다.

44) 논리적 절차를 컴퓨터가 수행할 수 있도록 알고리즘과 명령을 코드 형태로 기술하는 과정이다.

45) 실시간 영상 믹싱과 프로젝션 맵핑에 특화된 비주얼 소프트웨어이다.

2) TouchDesigner 영상 제작 방식



[그림-12] GLSL 파라미터

영상 제작 과정은 노드 기반 구조를 기본으로 하되, 세부 형태 생성은 GLSL 셰이더 코드를 통해 직접 제어하는 방식으로 구성하였다. 이를 통해 도형의 구조, 움직임, 색상 변화를 수학적으로 정의하고, 시간에 따라 지속적으로 변형되는 영상을 실시간으로 생성할 수 있었다. 기본적인 오퍼레이터 설계 구조는 [그림-12]와 같으며 이후 **text DAT**⁴⁶⁾에 입력하는 코드는 <표-3>과 같이 크게 세 가지 형태로 GLSL 셰이더 코드를 분석하고 활용할 수 있다.

<표-3> GLSL 구분

GLSL 기반 형태 생성	텍스처 공간에서 기본 도형을 수학적 함수로 직접 정의하여 형태의 구조를 구성함.
UV 좌표 변조(perturbation)	좌표계에 함수를 적용하여 형태의 흐름, 진동, 변형을 구현함.
wave 함수 기반 순환 모델	중심점에서의 거리와 시간을 결합한 파형 함수를 이용해 원이 확장, 수축하는 구조를 생성함.

46) 텍스트 기반 데이터를 타 오퍼레이터에서 참조할 수 있게 하는 오퍼레이터

① GLSL 기반 형태 생성

GLSL 셰이더에서의 형태 생성은 텍스처 좌표계(UV)⁴⁷⁾를 기준으로 각 픽셀의 값을 계산하는 방식으로 이루어진다. 본 연구에서는 원(circle), 막대(rect), 선(line)과 같은 기본 도형을 모두 코드 내부에서 정의하였으며, SOP⁴⁸⁾나 별도의 텍스처 소스를 사용하지 않고 수학적 조건식과 거리 함수를 통해 형태를 구성하였다. 셰이더에서 사용하는 기본 좌표는 보통 0~1 범위의 UV 좌표이므로, 형태의 중심과 스케일을 다루기 위해 다음과 같은 전처리를 수행한다.

$$vec2\ p = uv * 2.0 - 1.0$$

- 가. $vec2$: 2차원 좌표(x, y)를 저장하기 위한 GLSL 벡터⁴⁹⁾이다.
- 나. p : 변환된 좌표를 저장하는 변수로, 이후 셰이더 연산의 기준 위치로 사용된다.
- 다. uv : 0~1 범위의 UV 좌표를 -1~1의 정규화 좌표계로 변환하기 위해 사용된다.

화면 중심 정렬을 위해 위와 같이 좌표를 -1~1 범위로 변환하고 비율을 고려해 x, y 축을 스케일링 한다. 여기서 $vec2$ 는 두 개의 실수(float)로 구성된 2차원 벡터 타입이며, p 는 중심 기준으로 재정렬된 좌표를 의미한다. 따라서 [그림-13]의 ($p = uv * 2.0 - 1.0$) 식의 변환은 화면 좌표

47) 텍스처 공간에서 0-1 범위를 갖는 2차원 좌표계로, 픽셀 위치를 정규화하여 표현하는 좌표를 말한다.

48) TouchDesigner에서 기하학적 형태를 생성하고 조작하는 Surface Operator 계열 노드

49) 크기와 방향을 함께 가지는 수학적 값으로 좌표에 활용된다.

를 정규화하여, 이후 각 도형 함수가 일정한 기준 좌표에서 연산될 수 있도록 한다.

첫 번째 형태인 원형 구조를 구현하기 위해 중심점 c 에서의 거리 $\{r = \text{length}(p - c)\}$ 를 계산하고, 원하는 반지름과 두께(thickness)에 대해 $\{\text{abs}(r - R)\}$ 값이 특정 범위 안에 들어오는 영역만 남겨두는 방식으로 링 형태를 만들었다. 시각적으로 구현하기 위해 `vec4 fragColor50)`로 배경과 원의 색을 구분하고 경계가 계단처럼 보이지 않도록 `smoothstep51)` 명령어를 사용해 안티에일리어싱(anti-aliasing)⁵²⁾을 적용한다.

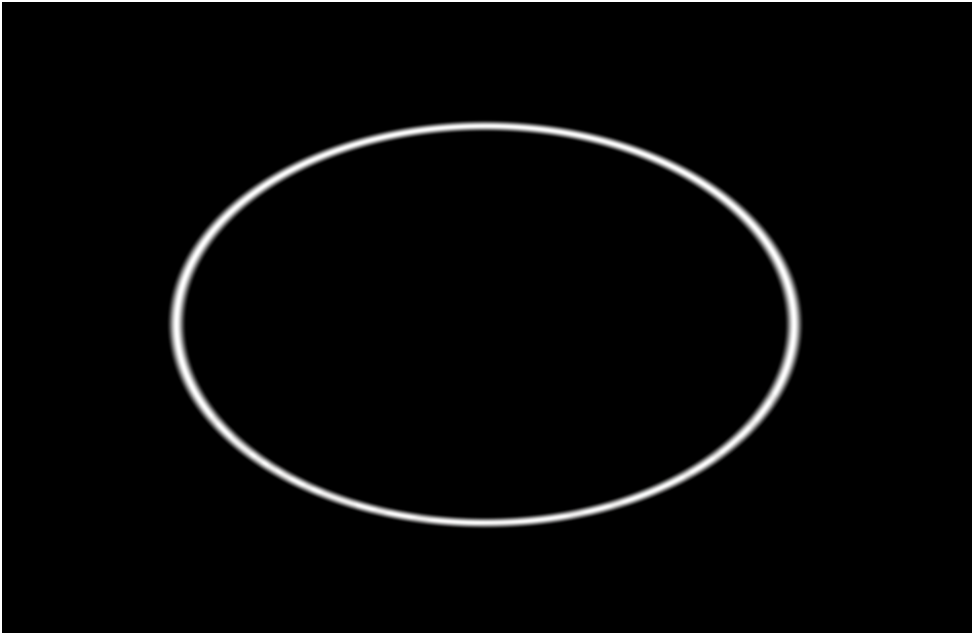
```
1 uniform vec2 u_resolution;
2 out vec4 fragColor;
3
4 float ring(vec2 p, vec2 c, float R, float thickness){
5     float r = length(p - c);
6     float d = abs(r - R);
7     return smoothstep(thickness, 0.0, d);
8 }
9
10 void main()
11 {
12     vec2 uv = gl_FragCoord.xy / u_resolution;
13     vec2 p = uv * 2.0 - 1.0;
14     float mask = ring(p, vec2(0.0), 0.6, 0.02);
15     vec3 col = vec3(mask);
16     fragColor = vec4(col, 1.0);
17 }
18
```

[그림-13] 원 형태 생성 코드

50) RGBA(빨강·초록·파랑·알파) 네 가지 성분으로 이루어진, 픽셀 한 개의 최종 색상을 의미하는 출력 변수

51) 두 경계값 사이를 부드럽게 보간하여 계단 현상을 줄이는 함수

52) 계단형 경계를 완화해 형태의 가장자리를 부드럽게 만드는 처리 기법



[그림-14] 원 형태 코드 적용 결과

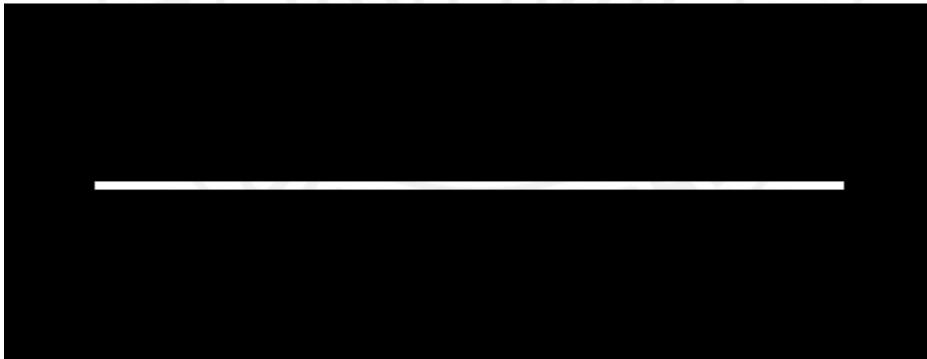
원형 링은 중심점 c 에서의 거리 $\{r = \text{length}(p - c)\}$ 를 기준으로 반지름 주변의 얇은 범위를 남기는 방식으로 구현되었다면, 선과 막대 형태는 동일한 좌표 p 를 사용하지만, 전체 방향의 거리를 고려하지 않고 특정 축 성분만을 조건식에 남긴다는 점에서 차이가 있다. 예를 들어 수평 막대는 $(p.y - c.y)$ 값이 두께 범위 안에 포함되는 영역을 유지하는 방식으로 생성되며, 수직 막대는 $(p.x - c.x)$ 에 동일한 조건을 적용한다.

```

1 uniform vec2 u_resolution;
2 out vec4 fragColor;
3
4 float lineRect(vec2 p, vec2 center, float halfLength, float halfWidth){
5     vec2 q = p - center;
6     vec2 d = abs(q) - vec2(halfLength, halfWidth);
7     float dist = max(d.x, d.y);
8     float aa = 0.005;
9     return smoothstep(aa, 0.0, dist);
10 }
11
12 void main()
13 {
14     vec2 uv = gl_FragCoord.xy / u_resolution;
15     vec2 p = uv * 2.0 - 1.0;
16
17     float mask = lineRect(p, vec2(0.0), 0.8, 0.02);
18
19     vec3 col = vec3(mask);
20     fragColor = vec4(col, 1.0);
21 }
22

```

[그림-15] 선 형태 생성 코드



[그림-16] 선 형태 코드 적용 결과

② UV 좌표 변조(perturbation)

기본 형태가 정의된 이후에는, 이를 정적인 상태에 두지 않고 시간에 따라 계속 변화하도록 하기 위해 UV 좌표에 다양한 변조(perturbation)를 적용하였다. 이 과정은 형태의 흔들림, 흐름, 요동과 유사한 시각적 효과를 만들어내는 핵심 단계이다. 사인, 코사인과 같은 삼각함수를 사용하여 특정 방향으로 반복적인 요동을 생성한다.

$$p.x += \sin(p.y * \text{freq} + \text{time} * \text{speed}) * \text{amp};$$

가. p.x : 좌표 p의 x축 값을 의미하며, 해당 줄에서는 x축 위치를 변위시키는 대상이 된다.

나. $\sin(p.y * \text{freq} + \text{time} * \text{speed})$: y축 위치에 주파수(freq)를 곱하고 시간(time)에 속도(speed)를 적용하여 생성된 값으로부터 사인 파형 변위를 계산하는 부분이다.

다. amp : 사인 변위의 최종 진폭을 조절하는 값으로, 변형의 크기(흔들림 강도)를 결정한다.

위와 같은 식은 y 방향 위치에 따라 x 방향으로 파동을 주어, 수평으로 회전하는 물결과 유사한 움직임을 만든다. 단일 파형만 사용할 경우 규칙성이 지나치게 뚜렷해지므로, 여러 함수나 노이즈 기반 값을 중첩하여 좌표를 다시 한 번 뒤틀어준다. 이를 도메인 워핑(domain warping)이라 하며 코드에 적용할 수 있는 식은 아래와 같다.

$$p += f1(p + \text{time}) * a1 + f2(p * \text{scale} - \text{time}) * a2;$$

가. $f1(p + time)$: 입력 좌표에 시간(time)을 더하여 첫 번째 왜곡 함수 $f1$ 이 시간에 따라 변하는 동적 패턴을 생성하도록 한다.

나. $a1$: $f1$ 에서 만들어진 변위를 얼마만큼의 강도로 적용할지 결정하는 가중치이다.

다. $f2(p * scale - time)$: 좌표 p 에 $scale$ 값을 곱해 공간적 주기를 늘리거나 줄인 뒤, $time$ 을 빼서 반대 방향으로 진행하는 두 번째 변형 패턴 $f2$ 를 만든다.

```
28 // ----- UV 변조 (원 내부만 변형) -----
29 float w1 = warp1(p, u_time * 1.0);
30 float w2 = warp2(p * 1.7, u_time * 0.6);
31
32 vec2 pw = p;
33 pw.x += w1 * 0.05;
34 pw.y += w2 * 0.04;
35
36 // ----- 변형된 원형 마스크 -----
37 float mask = circle(pw, 0.55, 0.04);
38
39 // 원 = 흰색(1), 배경 = 검정(0)
40 vec3 col = vec3(mask);
41 fragColor = vec4(col, 1.0);
42 }
```

[그림-17] UV좌표 변조 코드



[그림-18] UV좌표 변조 코드 적용 결과

지나친 변조로 인해 화면 밖으로 좌표가 벗어나거나, 패턴이 끊긴 것처럼 보이는 현상을 방지하기 위해 `fract`⁵³⁾나 `clamp`⁵⁴⁾ 함수를 적절히 사용하여 좌표를 다시 0-1 범위로 되돌리거나 반복되도록 설정하였다. 이 UV 좌표 변조 단계는 기본 도형을 물결처럼 움직이는 구조로 변환하는 역할을 하며, 파라미터 진폭과 주파수 값을 조정함으로써 파동의 강도를 자유롭게 설정할 수 있다.

53) 값의 소수 부분만을 남겨 0-1 구간으로 되돌리는 GLSL 함수

54) 값을 지정된 최소·최대 범위 안에 제한하여 벗어나지 않도록 하는 함수

③ wave 함수 기반 순환 모델

마지막 단계에서는 wave(파동) 함수를 이용하여 전체 구조의 순환을 정의하였다. 이 모델은 원형 구조의 확장, 수축과 그에 수반되는 밝기, 색상 변화를 시간에 따라 반복시키는 역할을 한다. 우선 중심점에서의 거리를 계산하고, 이를 독립 변수로 하는 파형 함수를 구성한다. 기본적인 형태는

$$wave = \sin(2.0 * \pi * f * r - \omega * t + \phi);$$

와 같이 반경과 시간에 따라 변하는 사인과 구조를 갖는다. 하나의 파형만 사용할 경우 단조로워지므로, 서로 다른 주파수와 위상을 가진 파형을 여러 개 중첩하여

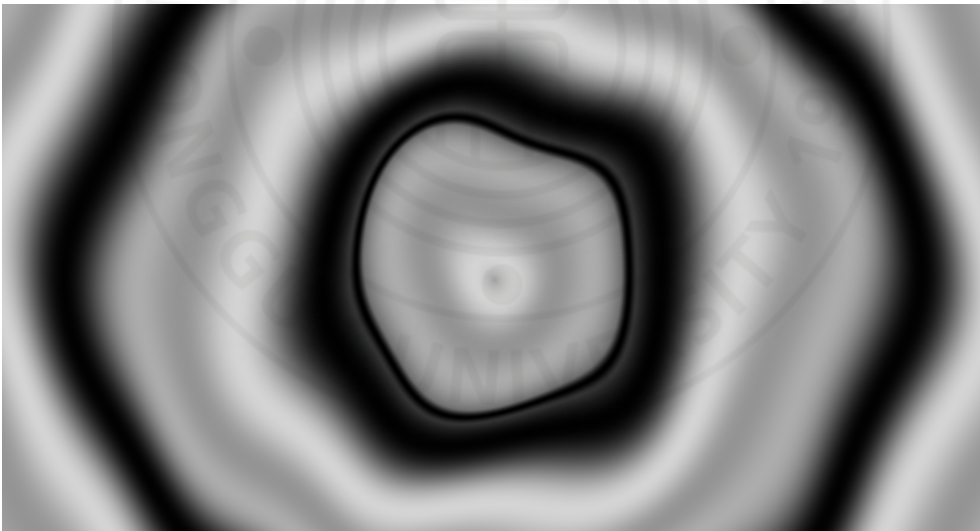
$$waveTotal = w1 * a1 + w2 * a2 + ...;$$

와 같은 구조를 만들 수 있다. 이를 통해 파동의 크기와 간격이 시간에 따라 미묘하게 변화하는 효과를 얻는다. 두께 제어를 위해 파형 값이 0에 가까운 영역을 링의 경계로 사용하고, 그 주변 일정 범위를 smoothstep 명령어로 감싸 두께와 부드러움을 조정한다. 이렇게 생성된 마스크는 원형 구조의 알파 값이나 밝기를 제어하는 데 사용된다. 순환 주기는 ω (각속도)와 f (공간 주파수)를 조절함으로써 ‘한 번의 팽창과 수축이 얼마나 빠르게 일어나는지’, ‘실질적인 파동 간 간격이 어느 정도인지’를 결정한다. 이 wave 함수 기반 순환 모델은 원의 팽창·수축 이미지를 수학적으로 규정하는 틀을 제공하며, 앞서 설명한 형태 생성, 좌표 변조, 흐름 필드와 결합하여 최종적인 시각 구조를 형성한다. [그림-19]는 위의 코드

에서 추가된 wave 함수이다.

```
21 // 반경 기반 wave 함수
22 float radialWave(vec2 p, float t){
23     float r = length(p);
24
25     float f1 = 1.2;
26     float f2 = 2.4;
27
28     float w1 = sin(6.2831853 * f1 * r - 0.8 * t);
29     float w2 = sin(6.2831853 * f2 * r - 1.3 * t + 1.0);
30
31     return w1 * 0.6 + w2 * 0.4;
32 }
```

[그림-19] wave함수 코드



[그림-20] wave함수 적용

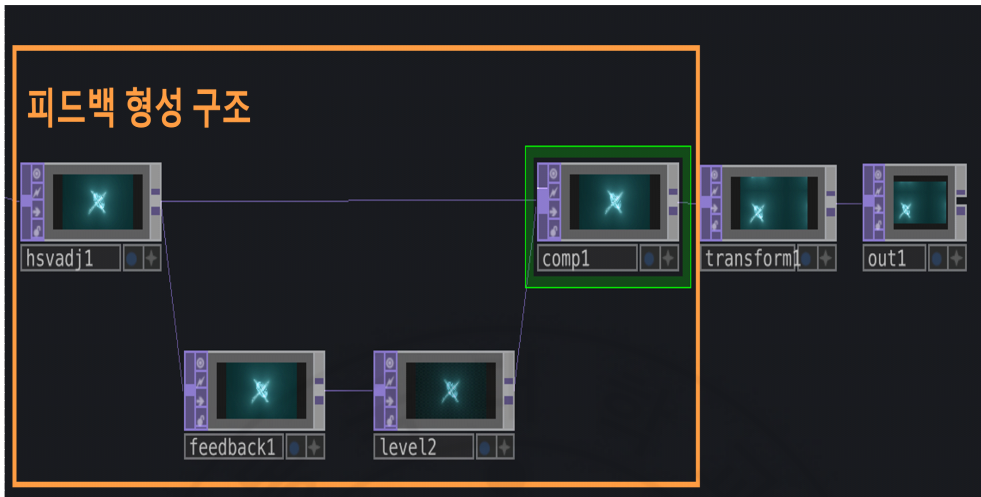
3) 영상 작업 과정

앞 절에서 서술한 GLSL 기반 형태 생성, 좌표 변조, 그리고 순환 모델은 TouchDesigner 내부에서 후처리(post-processing)⁵⁵⁾ 체계를 통해 최종 영상으로 정리되었다. 3D 벡터 환경에서 **GLSL TOP**을 통해 2D로 렌더링⁵⁶⁾ 된 다음 후처리 과정에서는 **HSV adjust TOP, transform TOP, level TOP, feedback TOP**을 중심으로 한 일련의 처리 구조가 사용되었다.

GLSL 셰이더에서 생성된 형태는 **HSV adjust TOP**을 통해 2D 화면에서의 색상을 다시 한 번 정리하고, **transform TOP**을 통해 위치, 회전, 스케일 등이 조정되며, 화면 내에서의 균형과 방향성이 정돈된다. 이어서 **level TOP**에서는 명도, 대비, 감쇠량 등을 미세하게 조정하여, 셰이더 계산 과정에서 발생할 수 있는 과도한 밝기 변화나 대비 손실이 최소화 되도록 하였다. 이후 **feedback TOP**은 시간 축에서의 정보를 축적하여 잔상과 흐름을 형성하는 핵심 요소로 작동한다. **feedback TOP** 구조는 이전 프레임의 이미지를 일정 비율로 남겨두고 새로운 프레임과 합성하는 방식으로 이루어지며, 이를 통해 GLSL 내부에서 계산된 점·선 기반 흐름이 화면 위에서 실제로 흘러가는 듯한 효과를 갖게 된다. 또한 순환 구조가 반복될 때 자연스럽게 흔적이 남아 시각적 깊이감이 형성되도록 한다.

55) 렌더링된 영상에 색상, 밝기, 변형 등 추가적인 시각 효과를 적용하는 보정·처리 단계

56) 3D 혹은 2D 데이터를 화면에 표시 가능한 최종 영상으로 변환하는 과정

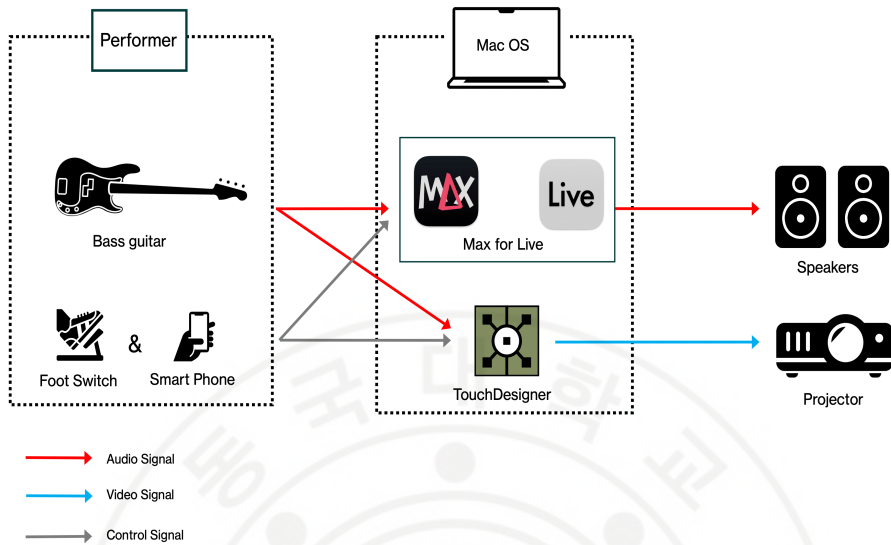


[그림-21] 영상 후처리 작업

3. 공연 시스템 구성

1) 공연 시스템 설계

실시간으로 생성된 영상 요소와 연주 기반 사운드 프로세싱이 상호 연동되는 공연 시스템을 구축하였다. 베이스기타의 연주 신호는 오디오 인터페이스를 통해 컴퓨터로 입력되며, Max for Live의 사운드 프로세싱을 거친 후 스피커로 출력된다. 스마트폰과 풋 스위치 같은 입력 장치가 TouchDesigner 내부의 파라미터에 직접 연결되어 사운드와 영상이 즉각적으로 반응하도록 설계하였다.



[그림-22] 공연 시스템 설계도

2) OSC 통신

OSC(Open Sound Control)⁵⁷⁾는 네트워크 기반으로 실시간 멀티미디어 데이터를 교환하기 위해 설계된 메시지 프로토콜로, IP 주소⁵⁸⁾와 포트 번호⁵⁹⁾를 통해 장치 간 데이터를 빠르고 안정적으로 전달할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 OSC 구조를 채택하여 스마트폰에서 수집된 센서 데이터를 TouchDesigner 및 Max로 전송하는 실시간 인터페이스를 구축하였다. 특히 Wi-Fi 환경에서 동작하는 OSC는 유선 연결이 어려운 무대

57) OSC(Open Sound Control)는 1997년 UC Berkeley의 CNMAT(Center for New Music and Audio Technologies)에서 제안된 프로토콜로, 네트워크 기반 실시간 멀티미디어 데이터 전송을 위해 설계된 메시지 포맷이다.

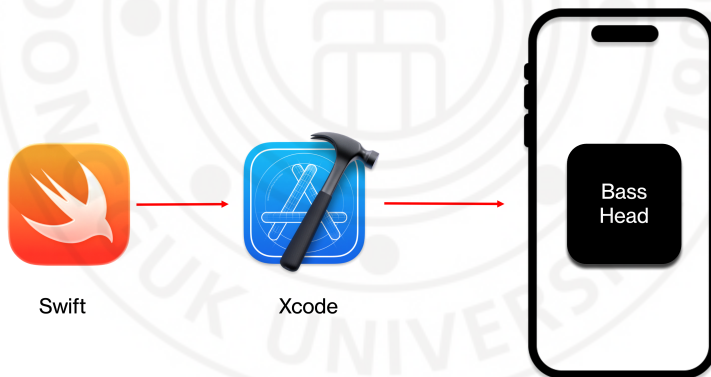
58) 네트워크에 연결된 장치를 구분하기 위해 부여되는 고유한 주소이다.

59) 하나의 IP 장치 안에서 특정 프로그램이나 서비스로 데이터를 전달하기 위해 사용되는 논리적 채널 번호이다.

환경에서 높은 이동성과 낮은 지연, 안정적인 데이터 흐름을 제공한다는 점에서 적합하였다. 스마트폰 애플리케이션의 센서 데이터를 실시간으로 수집하고, 지정된 IP 주소와 포트 번호로 전송한다. Max의 **udpreceive** 오브젝트가 이를 읽어들이며, 이와 같은 OSC 기반 구조를 통해 연주자의 움직임과 스마트폰의 물리적 회전이 영상 구조의 변형으로 즉각적으로 반영되는 인터랙티브 퍼포먼스 시스템이 구현되었다.

3) 스마트폰 애플리케이션 개발

① 애플리케이션 설계



[그림-23] 스마트폰 애플리케이션 제작 플랫폼

멀티미디어음악 작품의 라이브 퍼포먼스 환경에서는 센서 데이터를 외부 시스템으로 지속적이고 안정적으로 전송할 필요가 있었다. 그러나 기존의 OSC 기반 상용 애플리케이션들은 실시간 퍼포먼스 요구를 충족하기에 부족한 면이 있었다. 특히 백그라운드 동작 미지원, 과도한 가격과 세밀한 데이터 전송 옵션의 부재 등은 공연 환경에 직접 적용하기에 제약으로 작용하였다. 이에 따라 무대 상황에 최적화된 OSC 송신 애플리케이션을 직접 설계 및 개발하는 방식을 채택하였다. 개발의 핵심 목표는 다음과 같다.

- 가. Wi-Fi 기반 공연 환경에서도 끊김 없는 저지연 전송
- 나. 가속도, 자이로, 나침반, 터치 등 확장된 센서 데이터 구조 지원
- 다. 백그라운드 상태에서도 유지되는 지속적 스트리밍
- 라. 연주 상황 변화에 즉각 대응할 수 있는 맞춤형 UI와 전송 옵션

각 요소는 라이브 퍼포먼스 환경에서 요구되는 안정성, 지연 최소화, 확장성, 사용자 조작 편의성 등을 확보하기 위한 방향으로 설계되었으며, 이를 기반으로 전체 시스템이 일관된 흐름 속에서 동작하도록 최적화하였다. 본 연구에서 개발된 iOS⁶⁰⁾ 애플리케이션은 Swift 언어⁶¹⁾를 활용해 Xcode⁶²⁾에서 구현되었으며, 베이스기타의 방향이 주로 수집하는 데이터가 되기 때문에 이름은 <Bass Head>로 명명했다. 이 애플리케이션은 iOS 18.4 버전에서 개발되었다.

60) Apple Inc.(애플)에서 개발한 아이폰 기반 모바일 운영체제(OS)

61) iOS 애플리케이션 개발을 위해 사용된 애플의 공식 프로그래밍 언어

62) iOS 애플리케이션을 개발 하기 위한 통합 개발 환경(IDE)

② 라이브러리 및 네트워크 구성

애플리케이션의 구조는 iOS 환경에서 실시간 센서 데이터를 안정적으로 처리하고 전송하기 위해 여러 핵심 프레임워크⁶³⁾를 기반으로 구성되었다. import 명령을 통해 라이브러리⁶⁴⁾에서 프레임워크를 불러오며 다음은 각 프레임워크의 역할에 대한 설명이다. SwiftUI는 전체 UI의 뼈대를 담당하며, CoreMotion과 CoreLocation은 가속도, 자이로, 나침반 등 모션 데이터를 수집하는 역할을 수행한다. 네트워크 계층은 iOS의 Network 프레임워크를 사용하여 UDP⁶⁵⁾ 기반 OSC 송출이 가능하도록 설계되었고, UIKit, AVFoundation, MediaPlayer는 화면 동작 유지, 오디오 세션 유지, 물리 버튼 이벤트 처리 등 공연 환경에서 필요한 보조 기능을 지원한다. 이러한 기반 위에서 OSC 메시지를 직접 구성하는 모듈을 구현하였다. OSC 주소와 여러 실수값을 네트워크 전송용 바이너리 포맷⁶⁶⁾으로 변환하는 단순한 구조로 설계하여, 센서 스트림을 최소 지연으로 처리할 수 있게 했다. 아래의 코드는 이러한 OSC 패킷 생성의 핵심 부분으로, 이후 이어지는 UDP 송신 모듈과 결합해 전체 데이터 흐름의 출발점이 된다.

63) 특정 기능을 수행하기 위한 구조와 흐름을 미리 제공하여, 개발자가 그 틀 안에서 코드를 작성하도록 하는 개발 환경이다.

64) 특정 기능을 수행하는 함수, 모듈의 집합으로, 필요할 때 개발자가 호출하여 사용하는 코드 묶음이다.

65) User Datagram Protocol의 약자로, 연결 절차 없이 데이터그램을 전송하는 비연결형 전송 프로토콜이다.

66) 데이터를 0과 1로 이루어진 이진수 형태로 인코딩하여 컴퓨터가 직접 처리할 수 있도록 저장하거나 전송하는 데이터 표현 방식이다.

```

1 import SwiftUI      앱 전체 UI의 뼈대를 구성하는 프레임워크
2 import CoreMotion   모션 데이터 수집
3 import CoreLocation 위치 데이터 수집(로파스 데이터용)
4 import Network      OSC데이터 UDP송신
5 import UIKit        백그라운드 작업
6 import AVFoundation 공연 중 플스크린 인터페이스를 안정적으로 유지하기 위한 오디오 세션 제어에 활용
7 import MediaPlayer   볼륨 버튼 이벤트를 감지
8

```

```

9 // MARK: - OSC Minimal
10 struct OSC {
11     static func encode(address: String, floats: [Float]) -> Data {
12         var data = Data()
13         func pad(_ s: String) -> Data {
14             var bytes = Array(s.utf8) + [0]
15             while bytes.count % 4 != 0 { bytes.append(0) }
16             return Data(bytes)
17         }
18         data.append(pad(address))
19         let tag = "," + String(repeating: "f", count: floats.count)
20         data.append(pad(tag))
21         for f in floats {
22             var be = f.bitPattern.bigEndian
23             data.append(Data(bytes: &be, count: MemoryLayout<UInt32>.size))
24         }
25         return data
26     }
27 }
28

```

OSC 메시지 규격에 맞춰 주소(address)와 float 배열을 네트워크로 전송 가능한 데이터로 변환하는 코드

[그림-24] 애플리케이션 개발 초기 세팅

③ UI 설계

UI⁶⁷⁾는 공연 환경에서 빠르고 직관적으로 사용할 수 있도록 최소한의 조작으로 핵심 기능에 접근할 수 있게 설계되었다. 메인 화면에는 센서 전송의 켜짐과 꺼짐(on/off) 전환, IP 주소와 포트 번호 설정, 전송 밀도와 주기 조절을 위한 슬라이더 등이 배치되어 공연 상황에서 네트워크 안정도와 반응 속도를 즉시 조정할 수 있다. 터치 영역은 연주자가 화면

67) UI(User Interface)는 사용자가 애플리케이션을 조작하기 위해 마주하는 화면 요소(버튼, 슬라이더, 텍스트 등)의 구성과 표현 방식이다.

을 누르거나 드래그하는 동작을 통해 음색 관련 파라미터를 실시간으로 제어하도록 구성하여 스마트폰이 일종의 컨트롤 패드처럼 작동하도록 하였다. 또한 스마트폰의 성능과 무대 네트워크 환경을 고려해 데이터 송신 속도를 조절하는 스로틀(throttle)⁶⁸⁾ 파라미터를 UI에 포함시켜, 지나치게 많은 데이터를 전송하여 지연이나 프레임 드롭이 발생하는 상황을 방지하고 각 센서별로 적절한 빈도를 설정할 수 있도록 하였다. 이러한 UI 구조는 연주자가 무대 위에서 시각, 음향 시스템을 안정적으로 제어할 수 있도록 하는 실질적 입력 장치로 기능한다.

<pre> 548 // MARK: - UI 549 struct ContentView: View { 550 @Environment(\.scenePhase) private var scenePhase 551 @StateObject private var streamer = SensorStreamer() 552 553 @AppStorage("targetHost") private var targetHost: String = "127.0.0.1" 554 @AppStorage("targetPort") private var targetPort: Int = 8000 555 @AppStorage("rateHz") private var rateHz: Double = 50 556 @AppStorage("sendAccel") private var sendAccel: Bool = true 557 @AppStorage("sendCompass") private var sendCompass: Bool = true 558 @AppStorage("sendTouch") private var sendTouchFlag: Bool = true 559 @AppStorage("compassResolutionDeg") private var compassResolutionDeg: Double = 0.1 560 @AppStorage("compassMinInterval") private var compassMinInterval: Double = 0.10 561 @AppStorage("touchResolution") private var touchResolution: Double = 0.1 562 @AppStorage("touchMinInterval") private var touchMinInterval: Double = 0.05 563 564 @State private var showFullscreenTouch = false 565 566 // Port number formatter (1...65535) 567 private let portFormatter: NumberFormatter = { 568 let f = NumberFormatter() 569 f.numberStyle = .none 570 f.minimum = 1 571 f.maximum = 65535 572 return f 573 }() 574 </pre>	<p>앱 내 센서 활성화 여부, 전송 주기, 스로틀 값 등을 @AppStorage로 저장하여 UI 상태와 네트워크 파라미터를 지속적으로 관리하는 설정 블록</p> <p>사용자가 입력한 포트 번호를 1-65535 범위로 제한하고 검증하는 NumberFormatter 설정부</p>
--	---

[그림-25] UI 함수식

68) 연속적으로 발생하는 입력이나 요청의 빈도를 제한하여 일정 시간 간격마다 처리되도록 제어하는 기법



[그림-26] UI 함수식 결과

④ 추가 기능

공연 환경에서의 안정성을 확보하기 위해, 애플리케이션은 화면이 꺼진 상태나 다른 애플리케이션으로 잠시 포커스가 이동한 상황에서도 센서 전송이 중단되지 않도록 백그라운드 전송 기능을 지원한다. 이는 무대 위에서 불필요한 화면 조작을 줄이고, 연주자가 몸의 움직임과 연주에만

집중할 수 있도록 하기 위한 설계이다. 또한 터치 제스처의 상태를 시각적으로 피드백하기 위해, 화면 상에 잔상이나 간단한 모션 그래픽을 더해 직관적으로 확인할 수 있도록 하였다. 이러한 추가 기능들은 연주자가 스마트폰을 하나의 신체 확장 인터페이스로 인식하게 만드는 데 기여하며, 본 연구의 인터랙티브 퍼포먼스 시스템에서 중요한 역할을 수행한다.



[그림-27] 터치 데이터 전송 및 실행

위의 과정을 통해 연주자가 스마트폰을 이펙터 및 악기처럼 사용할 수 있도록 하는 입력 장치 역할을 수행하며, 연주 동작과 영상 반응을 자연스럽게 연결해 주는 핵심 요소이다.

4) 풋 스위치를 이용한 모드 전환



[그림-28] 풋 스위치 맵핑 설계

연주 중 양손이 모두 사용되는 상황을 고려하여, 장면 전환 및 효과 모드 변경은 풋 스위치를 통해 이루어지도록 설계하였다. 풋 스위치 입력은 단순한 0과 1의 신호이지만, TouchDesigner의 **switch CHOP**⁶⁹⁾을 활용하여 활성화와 비활성을 통해 순환형(switching cycle) 제어 구조를 구성하였다. 이를 통해 공연자는 손을 사용하지 않고도 발의 움직임을 통해 실시간으로 장면을 변화시키며 작품의 흐름을 조정할 수 있고, 사운드와 비디오 간의 실시간 상호작용을 자연스럽게 유지할 수 있다.

69) 여러 신호 흐름 중 하나를 선택해 장면 전환하듯 출력 경로를 바꿔주는 스위칭 노드

III. 연구 기술의 작품 적용

1. 작품 소개

본 연구를 기반으로 베이스기타의 실시간 사운드 프로세싱과 영상 시스템을 이용한 인터랙티브 멀티미디어음악 작품 <Low Tide>는 2025년 11월 8일 동국대학교 이해랑 예술극장에서 진행된 한국 멀티미디어음악학회(SIMM)의 ‘SEEING SOUND LISTENING IMAGE(보는 소리, 듣는 영상) 2025’ 공연에서 초연되었다.



[그림-29] 작품 <Low Tide>의 공연 이미지

본 작품은 공연 공간 안에서 연주자의 움직임, 스마트폰 센서 데이터, 풋스위치 제어 등을 통해 변화하는 시각 효과를 구성하며, 파도라는 자연 현상이 지닌 반복과 변주, 잠시 머물렀다가 흘러가는 흐름을 추상적 영상으로 재해석하였다. 베이스기타는 연주의 질감과 강약에 따라 서로 다른 파동적 이미지가 생성되도록 설계되었으며, 저역대의 깊고 묵직한 소리는 파도의 잔향과 유사한 울림으로 확장된다. 연주 과정에서 생성되는 음향적 에너지는 실시간 사운드 프로세싱을 통해 변조되며, 이는 파도 아래에서 느껴지는 압력 변화나 해류의 요동을 표현하는 청각적 장치로 기능한다.

<Low Tide>는 사운드와 영상이 실시간으로 상호 반응하는 멀티미디어 음악 퍼포먼스로, 파도 속에 잠겨 있는 듯한 분위기와 흐름의 이미지를 공간 전체로 확장하는 것을 목적으로 한다. 이를 통해 관객은 연주, 영상, 신체 움직임이 결합된 하나의 통합된 경험 속에서, 파도의 리듬 안에 몰입하는 감각적 체험을 하게 된다.

2. 작품 구성

1) 음악 구성

음악 구성은 <표-4>와 같이 A-B-C-A'-B'의 흐름을 따르며, 마지막 장면에서 다시 A로 회귀하는 수미상관 구조로 작곡하였다. 전반적인 작곡 체계는 저역대의 명료도를 확보하는 5도 중심의 음정 구조⁷⁰⁾로 장, 단조의 제한을 벗어난 모드 스케일⁷¹⁾의 개방성, 그리고 긴장과 색채를

70) 완전5도 음정 관계를 축으로 음들이 조직되어 조성적 안정감을 형성하는 구조이다.

71) 특정 기준음 위에서 형성된 고유한 음정 배열을 갖는 스케일들의 총칭이다.

미세하게 조절할 수 있는 미시음정적⁷²⁾ 접근을 결합하여 구성되었다. 이를 통해 각 장면은 안정과 변형의 반복으로 유기적으로 연결되며, 시각적 요소와 함께 다층적인 감각 변화를 생성하도록 설계되었다. 아래 <표-4>는 위에 기술한 음향 효과들이 각 파트에 어떻게 적용되었는지 나타낸다.

<표-4> 음악 작품 구조

section	화성적 요소	연주적 요소
A	5도 중심 진행	핑거링
B	5도 중심 파워 코드 진행	핑거링, 스트로크
C	모드 스케일	핑거링
A'	5도 중심 진행, 전조	핑거링, 하모닉스
B'	미시음정적 진행	스트로크

A section은 5도 기반 진행을 사용하여 베이스기타의 낮은 음역에서 만들어지는 고요하고 안정된 분위기를 형성한다. 느린 리듬과 절제된 멜로디 라인은 서서히 심해로 내려가기 전의 차분한 진입을 암시하며, 작품 전체의 정서적 중심축을 설정한다. B section에 들어서면 모드 스케일이 도입되며 조성적 경직성이 크게 완화된다. 베이스기타의 하모닉스와 개방된 음정 구조가 사용되어 수중에서 시야가 넓어지고 새로운 공간적 체험이 펼쳐지는 느낌을 구현한다. 리듬 또한 정적인 안정에서 벗어나 느긋한 파동처럼 변화하며, 시각적 요소와 밀접하게 결합된다. C section은 모든 사운드를 제거하고 온전히 베이스기타가 솔로로 연주되는 구간이다. 믹솔리디안(mixolydian) 모드, 즉 장음계에서 7음이 반음 낮아진

72) 전통적 반음보다 더 미세한 간격을 사용해 음높이의 세분화를 일컫는 용어

스케일을 적용하여 심해에 들어간 듯한 편안한 연주로 시작하며, 점차 고조되는 분위기를 서서히 만들어간다. A' section에서는 동일한 중심음을 유지하되 파워 코드⁷³⁾와 보다 강한 어택감을 가진 스트로크 연주가 더해지며 긴장감이 서서히 상승한다. 핑거링과 스트로크 기법이 교차하며, 초기의 안정된 흐름이 변형된 에너지로 전환된다. 이 구간은 A section의 확장으로 기능하면서도 심해로 진입하는 감각적 밀도 증가를 표현한다. B' section에서는 미시음정적 움직임과 세분화된 리듬이 더해지며 구간의 확장된 음향이 긴장된 방향으로 회귀한다. 스트로크와 빠른 공격성을 가진 연주가 결합되어 심해 속에서 숨이 짧아지고 방향을 잃는 듯한 불안정한 동요가 드러난다. 이는 B section에서 형성된 열린 공간감과 대비되며 작품 후반부의 정서적 최고점을 형성한다. D음을 마지막 음으로 연주하며 다시 A section의 분위기로 회귀해 곡을 마무리하고, 수면으로 올라와 호흡을 되찾는 듯한 수미상관적 완결감을 부여한다.




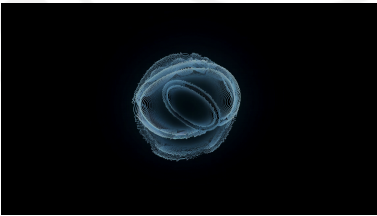
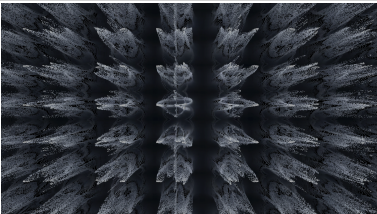
2) 영상 구성

위의 기술 설명에서는 2D 기반의 GLSL 연산 과정을 중심으로 원리와 처리 흐름을 설명하였다. 그러나 본 작품의 실제 구현 단계에서는 이러한 구조를 확장하여 3D 벡터 기반의 좌표계를 활용함으로써, 원과 선 요소를 입체적 공간에서 재해석한 환경으로 구성하였다. 평면상의 파형 표현보다는 심도, 거리, 공간적 배치를 반영한 입체적 상호작용 시각 구조를 구성하여 작품의 몰입감을 강화하였다. 원을 표현한 하나의 **GLSL TOP**과 선을 표현한 다른 **GLSL TOP**을 순차적으로 표현하기 위해 **cross TOP**을 사용하였다. 최종 단계에서는 **composite TOP**을 통해 각 처리 결

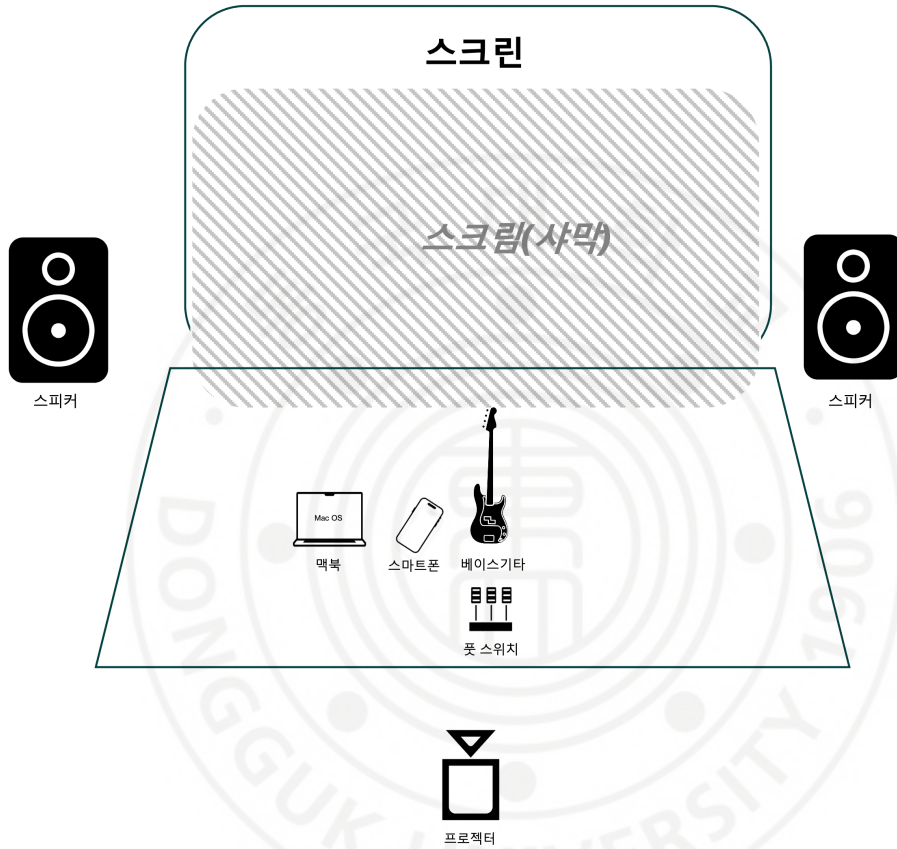
73) 근음과 완전5도를 중심으로 구성되어 장·단조의 성격을 배제한 채 강한 음향적 밀도를 형성하는 코드이다.

과가 하나의 영상으로 통합된다. 이로써 셰이더 기반의 수학적 파형 계산과 TouchDesigner의 후처리 체계가 결합된 형태의 완성된 영상이 생성된다.

<표-5> 영상 구성

section	이미지	의미
A (0:00~1:27)		파도 아래로 천천히 가라앉는 듯한 원 형태의 안정감 있는 공간을 상징
B (1:27~3:33)		선의 조합으로 심도가 깊어지며 감각이 예민해지는 순간의 긴장과 에너지 분출을 나타냄
C (3:33~4:21)		시야가 흐릿해지고 방향 감각이 잠시 사라지는 심연의 상태
A' (4:21~4:59)		초기 에너지의 왜곡된 잔향이, 균형을 회복하려는 움직임을 암시
B' (4:59~6:36)		호흡의 급박함이 극대화되는, 썰물이 밀려들어오는 듯한 불안정한 소용돌이를 시각화

3) 무대 구성



[그림-30] 무대 구성

[그림-30]은 작품 <Low Tide>의 무대 구성이다. 베이스기타에서 발생한 원음⁷⁴⁾과 실시간 사운드 프로세싱을 거친 오디오 신호는 공연장 좌우 측 스피커로 동시에 출력되며, 연주 동작과 연동되는 시각 요소는

74) 악기에서 직접 발생한 가공되지 않은 사운드

무대 전방의 프로젝터를 통해 스크린으로 송출되도록 구성하였다. 특히 본 작품에서는 정면 스크린 앞에 스크림(silk scrim)⁷⁵⁾을 얇은 층으로 두 겹 배치하여, 프로젝터 영상이 스크린과 스크림에 이중 투영되는 환경을 만들었다. 이로 인해 영상이 공중에서 떠 있는 듯한 홀로그램적 시각 효과가 형성되며, <Low Tide>의 심해적, 몽환적 분위기를 강화할 수 있었다. [그림-31]과 같이 풋 스위치는 연주자의 바로 앞에 배치하고 스마트폰은 베이스기타의 스트랩에 장착하여 베이스기타 연주와 사운드 프로세싱 조작을 하나의 통합된 제스처로 수행한다. 퍼포머는 연주 중 스마트폰 센서 기반의 제스처 컨트롤, 페달, 인터페이스 조작 등을 병행하며, 프로세싱 결과를 실시간으로 청취하면서 연주 강약, 타이밍, 주파수 선택 등을 즉각적으로 조절한다. 이러한 단일 연주자 중심의 신호 플로우는 연주와 프로세싱이 빠르게 순환하는 구조를 이루어, 시청각 변화가 하나의 유기적 흐름처럼 작동하도록 설계되었다.



[그림-31] 스마트폰과 풋 스위치

75) 빛의 확산과 투과를 위해 사용되는 반투명한 무대용 스크린 천

3. 작품에서의 사운드 및 영상 기술 적용

1) A section

<표-6> A section에 적용된 사운드 프로세싱 및 영상 프로세싱

section	사운드 프로세싱	영상 프로세싱
A	JCRev, delay	패턴 1

A section은 잔잔하게 밀려오는 파도 소리 위에 베이스기타가 서서히 겹쳐지며 시작된다. 베이스기타의 음량 값은 TouchDesigner로 전달되어 원형 고리의 진동과 확장을 제어하는 요소로 작동한다. 또한 베이스기타 스트랩에 부착된 스마트폰은 JCRev의 피드백 값을 실시간으로 조절하여 공간적 깊이와 금속적인 잔향감을 더한다. 이를 통해 멀어져 가는 파도의 감각을 시각, 청각적으로 확장하는 동시에, 톤이 점차 강해지면서 미세한 불연속성과 불안정성이 드러나는 흐름을 의도하였다.



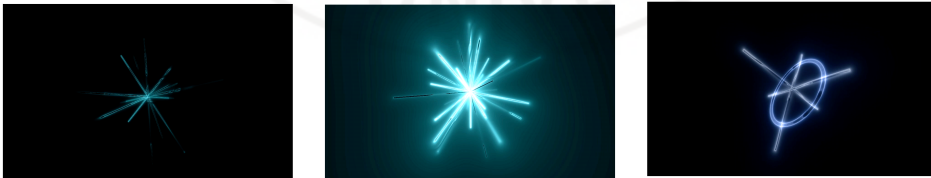
[그림-32] A section의 영상 변화

2) B section

<표-7> B section에 적용된 사운드 프로세싱 및 영상 프로세싱

section	사운드 프로세싱	영상 프로세싱
B	JCRev, delay, granular synth	패턴 2

B section에서는 원의 개수와 크기, 밝기, 움직임이 점차 증가하며 구조가 복잡하게 얽히는 시각적 고조감을 형성한다. 이 변화는 파도가 단순한 잔향을 넘어, 점점 밀도와 에너지를 축적하는 순간을 시각적으로 은유한다. 음악적으로는 스트로크 연주를 중심으로 여러 줄이 동시에 울리며, A section보다 훨씬 풍부하고 다층적인 베이스 사운드를 만들어낸다. 여기에 뮤트 연주법이 더해지며 순간적인 긴장과 해소가 반복되고, 리듬적 춤춤함이 강조된다. 또한 베이스 신호와 결합된 granular synth는 파도의 입자적 질감과 미세한 흔들림을 세부적으로 확장하여, 시각적 고조와 음향적 밀도가 서로 맞물려 상승하는 흐름을 구성한다. 결과적으로 B section은 시각, 음향적으로 ‘파도의 에너지 축적’이 완전히 드러나는 구간으로, 앞선 잔잔함 위에 숨겨져 있던 불안정성과 긴장감이 본격적으로 표면화되는 순간을 표현한다.



[그림-33] B section의 영상 변화

3) C section

<표-8> C section에 적용된 사운드 프로세싱 및 영상 프로세싱

section	사운드 프로세싱	영상 프로세싱
C	JCRev	X

C section에서는 최소한의 사운드 프로세싱 효과만 남겨두고, 재생되는 영상 없이 연주자가 솔로로 연주하는 구간이다. B section에서의 고조감이 해소되고 모드 스케일 중에서도 믹솔리디안을 채택해 따듯한 메이저틱한 소리이나 무언가 애매모호한 듯한 연주를 구성하였다. 또한 하모닉 마이너 (harmonic minor)⁷⁶⁾ 스케일을 추가해 다시 A' section으로 가기 전 고조되는 느낌을 주어 연주하였다. 조명 또한 가장 밝은 밝기로 연주자에게만 비추게 하여 감동을 극대화 하고자 의도하였다.

4) A' section

<표-9> A' section에 적용된 사운드 프로세싱 및 영상 프로세싱

section	사운드 프로세싱	영상 프로세싱
A'	JCRev, granular synth, loop station	패턴 3

A' section에서는 풋 스위치를 이용해 루프 스테이션을 작동시키며 연주된 소리들이 단계적으로 중첩된다. 특히 최저 음역대의 반복적 레이어

76) 자연단음계의 제7음을 반음 올려 형성된 음계로, 기능화성을 강화하기 위해 사용되는 단음계

링을 중심으로 구성하여, 마치 썰물이 깊숙이 밀려 들어오는 듯한 묵직한 흐름을 형성한다. 이 구간은 이전 C section에서의 차분한 베이스 솔로와는 뚜렷하게 대비된다. 고요하게 정리되었던 음들이 다시 다층적으로 얹히며 웅장하면서도 다소 혼탁한 질감의 사운드 덩어리를 만들어내고, 악곡 전체의 에너지 레벨을 다시 상승시키는 주요한 전환점으로 작용한다. 또한 그동안 중심적으로 사용되던 코어 음을 G에서 D로 전조함으로써, 청각적 고조감을 한층 더 강화하고 새로운 긴장감을 부여하였다. 시각적 요소 또한 음향과 연동되어 진화한다. 기존 A section에서 등장했던 원형 구조는 파티클로 분해되어 흩어지고, 마치 깨져 나가는 파편처럼 재조합되며 보다 복잡하고 격렬한 이미지를 만들어낸다. 이는 레이어가 겹겹이 쌓이는 베이스 사운드와 맞물려 혼돈 속 고조, 그리고 다시 밀려오는 파도의 힘을 시각, 청각적으로 함께 체감하게 한다.



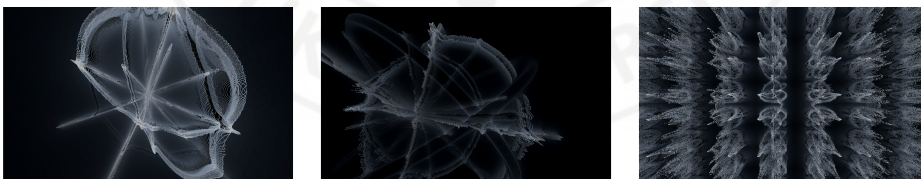
[그림-34] A' section의 영상 변화

5) B' section

<표-10> B' section에 적용된 사운드 프로세싱 및 영상 프로세싱

section	사운드 프로세싱	영상 프로세싱
B'	JCRev, additive synth, granular synth, loop station	패턴 4

B' section은 곡 전체에서 가장 극적인 정점을 향해 치닫는 구간으로, 엔딩을 향한 끝없는 파도의 들이침을 목표로 구성되었다. A' section에서 겹겹이 쌓이던 루프는 한 차례 리셋된 후 다시 중첩되기 시작하며, 사운드는 더욱 절박하고 높은 밀도로 고조된다. 연주적으로는 하모닉스 기법을 통해 고음역대의 잔향이 길게 남도록 설계했고, 스트로크는 미시 음정적으로 피치를 약간 끌어올린 연주법을 사용해 긴장감을 극대화한다. 여기에 granular 프로세싱으로 특정 구간의 피치를 추가 상승시켜, 파도가 한 번 더 크게 부풀어 올랐다가 터지는 듯한 상승감을 더했다. 베이스기타의 최고음을 연주하며 가미한 미세한 벤딩⁷⁷⁾ 또한 불규칙한 파형을 만들어내어, 들이치는 파도의 예측 불가능한 에너지를 음향적으로 구현한다. 시각적 요소 역시 이 고조된 사운드와 호흡을 맞춘다. 기존에 등장하던 원과 선은 끝없이 확대, 수축하다가 파티클로 폭발하듯 흩어지며, 움직임의 속도는 최대치에 도달한다. 화면 전체가 거대한 에너지의 소용돌이처럼 흔들리며, 감정적 정점이 구축된다. 마지막 음이 울리는 순간, 화면은 조용히 다시 A section의 첫 장면으로 전환되며, 작품은 시작과 끝이 서로 맞물리는 수미상관 구조로 마무리된다.



[그림-35] B' section의 영상 변화

77) 현의 장력을 조절해 음정을 위·아래로 연속적으로 변화시키는 연주 기법

4. 기대 효과

스마트폰 센서와 베이스기타를 결합한 실시간 멀티미디어음악 작품을 구현하면서, 앞으로의 인터랙티브 공연이 어떤 방식으로 확장될 수 있는지에 대한 실질적인 가능성을 기대한다. 스마트폰이라는 일상적인 기기를 악기의 일부처럼 활용하는 방식은, 별도의 복잡한 장비 없이도 연주자의 움직임은 곧바로 시각, 음향 변화로 연결할 수 있다는 점에서 의미가 크다. 이는 인터랙션 기반 작품 제작의 접근성을 높이고, 다양한 연주자들이 기술적 장벽 없이 새로운 형태의 공연을 시도할 수 있는 기반을 마련한다.

또한 베이스기타의 음향적 특성과 신체 기반 제스처 데이터를 하나의 흐름 안에서 결합한 구조는, 악기의 역할을 단순한 소리 생산을 넘어 하나의 인터페이스로 확장하는 방향을 제안한다. 이러한 접근은 다른 악기나 다른 종류의 센서로도 쉽게 응용될 수 있어, 후속 창작이나 연구에서도 참고할 만한 실천적 모델이 된다. TouchDesigner와 Max 중심으로 구축한 실시간 매핑 구조 역시, 교육이나 스튜디오 실습 환경에서 유용하게 재사용될 수 있을 만큼 단순하면서도 확장성이 있어, 인터랙티브 작품 제작을 배워가는 이들에게 직접적인 도움을 줄 수 있다.

본 작품은 시각, 음향, 신체 동작이 분리되어 존재하는 것이 아니라, 하나의 감각적 경험으로 통합되도록 설계되었다. ‘파도’라는 주제는 미리 정해진 이미지나 소리가 아니라, 연주자의 움직임과 음향의 변화, 그리고 영상의 변형이 함께 얽히는 과정 속에서 다시 구성된다. 프랑스 철학자 <모리스 메를로퐁티>(Maurice Merleau-Ponty, 1908-1961)가 말한 것처럼, 세계는 지각 속에서 비로소 형태를 갖추는데, <Low Tide>의 파도 역시 관객의 지각 안에서 완성되는 현상으로 제시된다. 이러한 방식은 기술을 사용하는 작품들이 단순한 시각 효과나 음향 처리를 넘어서, 관

객의 감각을 중심에 두는 새로운 공연 형태로 확장될 수 있음을 보여준다. 본 연구는 스마트폰 센서와 악기 연주, 실시간 프로세싱을 통합한 하나의 사례를 넘어서, 앞으로의 인터랙티브 공연 예술이 나아갈 방향을 탐색하는 데 유효한 출발점이 될 수 있으리라 기대한다.



IV. 결론

멀티미디어음악 작품 <Low Tide> 연구의 결과는 명료한 방법론이나 하나의 구조라기보다, 연주 과정에서 감각이 어떻게 변형되고 정렬되는지를 몸으로 통과한 경험에 가깝다. 베이스기타의 저음은 소리로 먼저 인식되기보다 신체를 통과하는 진동으로 감각에 직관적으로 도달하며, 공간의 밀도와 거리감은 즉각적으로 달라진다. 연주가 이어질수록 감각은 한 지점에 머물지 않고 이동하고, 듣는 행위는 점차 시각과 신체 감각의 영역과 겹쳐진다. 소리는 대상처럼 앞에 놓이기보다는, 신체와 공간 사이를 지나가는 흐름으로 체감된다. 보다 우수한 장비가 존재했을 것으로 판단되나, 구태여 스마트폰을 고집한 것은 어디에나 있는, 누구나 가지고 있는 장비가 구상하던 파도의 그림과 개념적으로 부합했기 때문이다. 반드시 가지고 있는 장비, 어디에나 존재하나 모두가 같은 방식으로 사용하지 않는 무작위성과, 소형 컴퓨터의 역할, 항상 몸에 붙어 있으며 평소에 시청각을 가장 많이 느끼고 이제는 연필이나 볼펜, 수저보다도 편하게 다룰 수 있는 장비였기에 온몸을 자극시키는 저음의 떨림과 교집합을 만들어 낼 수 있었다. 작곡적 측면에서 반복 구조는 의미 전달을 위한 기능적 장치로 설정되지 않는다. 대중음악에서 반복은 주로 청자의 기억을 강화하고 의미를 명료화하는 역할을 수행하지만, 본 작품에서는 저음의 파동적 특성이 연주 과정 속에서 지속적으로 변화한다. 따라서 구조적 회귀는 발생하되, 동일한 음향 상태의 재현은 이루어지지 않는다. 소리가 멈춘 뒤에도 신체의 긴장과 공간에 남은 반응은 하나의 경험으로서 남아 있으며, 저음을 따라 발생하는 색감과 깊이의 인상 역시 매번 다르게 형성된다. 이 과정에서 시각과 청각은 분리된 감각의 인식으로 작동하기보다, 서로를 자극하며 하나의 덩어리처럼 움직인다. 연주자의 움직임은 소리를 만들어내는 행위와 그에 반응하는 신체 사이를 오간다.

의도와 우연, 제어와 흔들림은 분리되지 않은 채 엉켜 있고, 작품의 흐름은 이러한 불확정적인 선택들을 따라 형성된다. 기술적 시스템은 이를 통제하거나 해석하지 않고, 감각의 변화가 중단되지 않도록 지속을 가능하게 하는 조건으로 작용한다. 진동이 일시적으로 형상을 이루고, 그 변화가 다시 신체의 반응을 불러오는 과정은 고정된 방향 없이 이어진다. 인식은 여러 감각을 나누어 취합하는 방식이 아니라, 몸 전체를 통해 한꺼번에 발생한다. 서서히 고조되어가는 분위기를 통해 퇴조하는 파도의 긴장감을 온몸으로 감각할 수 있다.

<Low Tide>는 저음이라는 물리적 사건을 매개로 청각과 시각, 움직임의 인식이 서로 엇갈리는 지점을 드러낸다. 그 안에서 발생하는 경험은 설명을 요구하지 않고, 공연이 끝난 이후에도 신체 어딘가에 남아 작동한다. 그 잔여가 발생했던 한 시점의 순간을 조심스럽게 남겨 둔다.

Keyword(검색어) : 컴퓨터음악(computer music), 인터랙티브 음악(interactive music), 실시간 사운드 프로세싱(real-time sound processing), 베이스기타 퍼포먼스(bass guitar performance), 스마트폰 센서(smartphone sensors), 터치디자이너(TouchDesigner), 맥스(Max/MSP), 소리 합성(sound synthesis)

E-mail: leejwo1601@gmail.com

참 고 문 헌

1. 단행본, 학술지

- Alessandro Cipriani and Maurizio Giri, 'Electronic Music and Sound Design: Theory and Practice with Max 8, Vol. 1' (*ContempoNet, 2019*)
- Nick Collins, 'Introduction to Computer Music' (*Wiley, 2009*)
- David Creasey, 'Audio Processes: Musical Analysis, Modification, Synthesis, and Control' (*New York, Routledge, 2017*)
- Stefan Kostka and Dorothy Payne, 'Tonal Harmony with an Introduction to Twentieth-Century Music, 7th ed.' (*McGraw-Hill Education, 2012*)
- Joe Mulholland & Tom Hojnacki, 'The Berklee Book of Jazz Harmony' (*Berklee Press, 2011*)
- Maurice Merleau Ponty, 'Phenomenology of Perception' (*Routledge, 2012*)

- Miller Puckette, 'The Theory and Thechnique of Electronic Music'
(*World Scientific Publishing Company, 2006*)
- Curtis Roads, 'The Computer Music Tutorial' (*MIT Press, 1996*)
- Carol Vernallis & Amy Herzog & John Richardson,
'The Oxford Handbook of Sound and Image in Digital Media'
(*Oxford University Press, 2013*)
- Glenn D. White and Gary J. Louie, 'The Audio Dictionary, 3rd ed.'
(*University of Washington Press, 2005*)
- 강이연, '리:스펙트 - 한국 미디어 아트 2000년 이후'
(*Book Korea, 2023*)
- 송호정, 이범근, 'Do it! 스위프트로 아이폰 앱 만들기: 입문'
(*EasysPublishing, 2020*)
- 주우석, 'IT CookBook, OpenGL로 배우는 3차원 컴퓨터 그래픽스'
(*Hanbit Academy, 2022*)

2. 참고 논문

- 김연호, 「인터페이스 DIMENSION을 이용한 인터랙티브 멀티미디어 작품 제작 연구(멀티미디어 작품 <Tesseract>를 중심으로)」 (동국대학교 영상대학원 멀티미디어학과, 2025)
- 김요한, 「막형 전위차계와 압력 센서를 활용한 인터랙티브 전자악기 제작 및 공연 연구 (멀티미디어 작품 <Splinters of Light: 빛의 파편>을 중심으로)」 (동국대학교 영상대학원 멀티미디어학과, 2025)
- 김진웅, 「줄타기를 이용한 인터랙티브 멀티미디어 시스템 제작 연구 (멀티미디어음악 작품 <Bassline>을 중심으로)」 (동국대학교 영상대학원 멀티미디어학과, 2015)
- 라경외, 「밴드음악을 활용한 실시간 사운드 프로세싱과 비주얼라이제이션 연구 (멀티미디어 작품 <Blue Lagoon>을 중심으로)」 (동국대학교 영상대학원 멀티미디어학과, 2022)
- 라지웅, 「Max/MSP와 Generative Art를 이용한 멀티미디어음악 제작 연구(멀티미디어음악 작품 <Trans-Human>을 중심으로)」 (동국대학교 영상대학원 멀티미디어학과, 2018)
- 오이링, 「베이스기타의 실시간 사운드 프로세싱을 이용한 인터랙티브 멀티미디어 작품 제작 연구 (멀티미디어음악 작품<Dive>를 중심으로)」 (동국대학교 영상대학원 멀티미디어학과, 2024)

- 오지현, 「색청을 이용한 공감각적 작품연구」 (국민대학교 종합예술대학원 실용음악과, 2020)

- 이도희, 「베이스 기타의 실시간 사운드 프로세싱을 이용한 멀티미디어음악 작품 제작 연구(멀티미디어음악 작품<Overcome>을 중심으로)」 (동국대학교 영상대학원 멀티미디어학과, 2022)

- 이동규, 「Interface(INPUTO)를 이용한 인터랙티브 콘텐츠 연구 (멀티미디어음악작품 <The Tree>를 중심으로)」 (동국대학교 영상대학원 멀티미디어학과, 2011)

3. 웹사이트

- Ableton: <https://www.ableton.com>

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

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

- Xcode: <https://developer.apple.com/kr/xcode>

- 동국대학교 영상대학원 MARTE Lab: <http://marte.dongguk.edu>

ABSTRACT

A Study on Real-Time Multimedia Music Works Using Smartphone Sensors and Bass Guitar

-Multimedia Music Work <Low Tide>-

LEE, JIWOO

Dept. of Multimedia
Graduate School of Digital Image and Contents
Dongguk University

<Low Tide> is a multimedia music work that integrates bass guitar performance, smartphone sensor data, and real-time audiovisual processing within an interactive system. The work explores the expansion of musical expression through the convergence of live instrumental performance and computational media, emphasizing the interaction between sound, movement, and visual form. The bass guitar is treated not only as a musical instrument but also as a physical interface, foregrounding the performer's bodily gestures as a driving force of audiovisual change.

The system extends the expressive range of the instrument through granular synthesis, additive synthesis, and reverberation implemented in Max for Live. These processes generate timbral

variations and high-frequency textures that exceed the acoustic limitations of the bass guitar, transforming low-frequency performance material into evolving sonic layers that respond to changes in playing intensity and articulation. Smartphone motion sensor data, transmitted via OSC, functions as an additional input source that modulates key parameters in both sound processing and GLSL-based visuals developed in TouchDesigner. The performer's gestures directly influence the behavior of the audiovisual output, enabling a continuous correspondence between physical movement, sound transformation, and visual change.

Through this real-time linkage, sound and image operate as interdependent elements rather than separate layers. The visuals emerge not as illustrative accompaniments but as parallel manifestations of shared performance data, forming an immersive environment in which musical expression and visual transformation unfold as a unified process. Unlike performances relying on pre-rendered media, <Low Tide> emphasizes live interaction and variability, inviting the audience to experience sound, movement, and visual change as a single integrated field.

부록-1 : 작품 <Low Tide> 악보

Low Tide

Jiwoo Lee

A (♩ = 60)

5

9

13

17

21

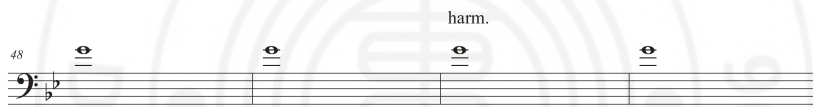
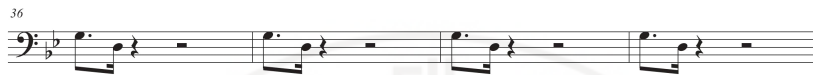
B 8^{va}

(8^{va})

30

Low Tide

2



C *Free Solo*



A'



Low Tide

3

68

72

B' 8^{va}

80 (8^{va})

84 (8^{va})

부록-2 : 첨부 DVD 설명

1. Low Tide video: 2025년 11월 8일 이해랑 예술극장 공연 영상
2. Low Tide score: 작품 악보
3. Low Tide max patch: 작품에 사용된 Max 패치 폴더
4. Bass Head code: 작품에 사용된 스마트폰 애플리케이션 개발 코드