



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

막형 전위차계와 압력 센서를 활용한
인터랙티브 전자악기 제작 및 공연 연구

-멀티미디어 작품 <Splinters of Light: 빛의 파편>을 중심으로-

지도교수 김 준

동국대학교 영상대학원 멀티미디어학과

김 요 한

2025

석사학위논문

막형 전위차계와 압력 센서를 활용한
인터랙티브 전자악기 제작 및 공연 연구

-멀티미디어 작품 <Splinters of Light: 빛의 파편>을 중심으로-

김요한

지도교수 김준

이 논문을 석사학위 논문으로 제출함

2024년 12월

김요한의 음악석사(컴퓨터음악)학위 논문을 인준함

2025년 1월

위원장 정진헌



위원 김정호



위원 김준



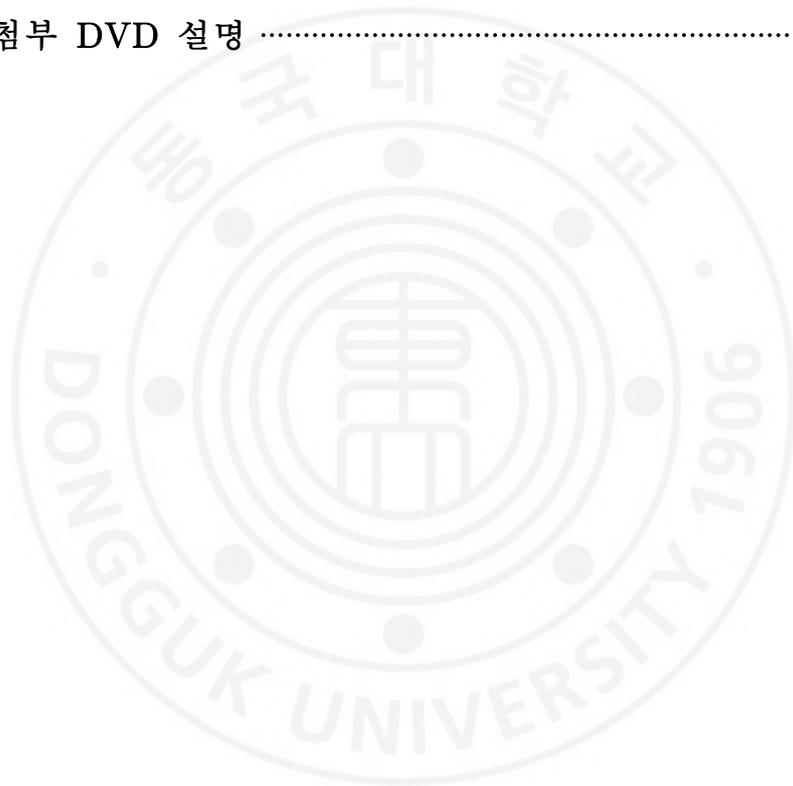
동국대학교 영상대학원

목 차

I. 서론	1
1. 연구 목적 및 배경	1
2. 사례 연구	3
3. 기존 연구와 차별성	5
II. 연구에 관한 이론적 배경	6
1. 인간 감각의 비선형적 특성과 음악적 표현	6
2. 디지털 인터페이스 기술:막형 전위차계와 압력 센서 개요	10
1) 물리적 모델링	10
2) 수학적 데이터 처리 및 매핑	13
3) 시리얼 통신을 통한 데이터 전송	15
3. 음악적 표현과 물리적 상호작용의 통합	16
4. 인터랙티브 음악과 디지털 기술의 융합	16
III. 기술 연구	17
1. 하드웨어 악기와 소프트웨어의 통합 설계	17
1) 하드웨어 구성	17
2) 소프트웨어 설계	28
3) 센서와 인간 감각의 상호작용	40
4) 예술적 및 실용적 적용	44
5) 터치디자이너로 시각적 표현 제어	45

IV. 사운드 디자인 연구	50
1. 테이프음악을 위한 사운드 디자인	50
1) FM synthesis	51
2) PM&FM synthesis	57
3) wavetable synthesis	60
4) rhythm sequencer	63
5) FDN(feedback delay network) digital reverb	66
6) Karplus-Strong string synthesis	71
7) overdrive	75
8) cosine panning/constant power panning	79
V. 연구 기술의 작품 적용	84
1. 작품 소개	84
2. 작품 구성	87
1) 공연 시스템 및 무대 설계	87
2) 음악 구성	91
3) 영상 구성	94
4) 무대 구성	97
3. 작품에서의 사운드 및 영상 기술 적용	98
1) A 섹션	98
2) B 섹션	99
3) C 섹션	100
4) D 섹션	101
5) E 섹션	102
4. 연구 기술의 작품 적용과 예술적 효과	103

VI. 결 론	105
참 고 문 헌	109
ABSTRACT	112
부록 : 첨부 DVD 설명	115



<표 목 차>

<표-1> 베버-페히너 법칙 수식	7
<표-2> 베버-페히너 법칙에 로그 함수 적용 수식	7
<표-3> 인간 감각의 비선형적 특성을 반영한 인터페이스 특성	9
<표-4> 막형 전위차계의 입력과 출력	11
<표-5> 막형 전위차계의 수학적 모델 수식	11
<표-6> 압력 센서의 입력과 출력	12
<표-7> 막형 전위차계의 수학적 모델 수식	12
<표-8> 아날로그에서 디지털 변환 수식	13
<표-9> 막형 전위차계의 위치 데이터를 주파수로 매핑 수식	14
<표-10> 압력 센서 데이터를 필터 커팅 주파수로 매핑 수식	14
<표 - 11> 풀다운(pulldown) 저항의 문제와 해결	22
<표 - 12> 음악 구성	91
<표 - 13.1> 영상 구성 (1)	94
<표 - 13.2> 영상 구성 (2)	95
<표 - 14> A 섹션에 적용된 사운드 프로세싱 및 영상 효과	98
<표 - 15> B 섹션에 적용된 사운드 프로세싱 및 영상 효과	99
<표 - 16> C 섹션에 적용된 사운드 프로세싱 및 영상 효과	100
<표 - 17> D 섹션에 적용된 사운드 프로세싱 및 영상 효과	101
<표 - 18> E 섹션에 적용된 사운드 프로세싱 및 영상 효과	102

[그림목차]

[그림-1] Korg Monotron	3
[그림-2] Korg Monotribe	4
[그림-3] 막형 전위차계	19
[그림-4] LED 스트립	20
[그림-5] 압력 센서	21
[그림-6] 막형 전위차계 저항에 따른 선형 반응	24
[그림-7] 리본 신스 설계도	25
[그림-8.1] 리본 신스 악기 완성본	27
[그림-8.2] 리본 신스 악기 완성본	27
[그림-9] 센서 데이터 시리얼 통신 기본 코드	28
[그림-10] Max/MSP 시리얼 데이터 수신 패치	29
[그림-11] 오디오(audio) 생성 패치	32
[그림-12] 오실레이터(oscillator) 패치	34
[그림-13] 리버브(reverb) 패치	35
[그림-14] 센서 데이터 시리얼 통신	38
[그림-15] 센서 데이터 로그 스케일	41
[그림-16] The dying swan-Natalia osipova(The royal ballet)	45
[그림-17] optical flow 데이터 환경	46
[그림-18] 오디오 분석을 시각적 데이터 변환	47
[그림-19.1] animation 노트 (1)	48
[그림-19.2] animation 노트 (2)	49
[그림-20] FM합성 도식	52
[그림-21] FM합성 오실레이터 패치	53

[그림-22] FM합성 패치	55
[그림-23] PM&FM합성 패치	57
[그림-24] wavetable합성 패치	60
[그림-25] rhythm sequencer 패치	64
[그림-26] feedback delay network	66
[그림-27] feedback delay network reverb 패치	68
[그림-28] feedback delay network reverb 서브 패치	69
[그림-29] Karplus-Strong 알고리즘 도식	71
[그림-30] Karplus-Strong string합성 패치	72
[그림-31] overdrive 패치	76
[그림-32] linear panning & constant power panning	79
[그림-33] pan method	80
[그림-34] cosine panning 패치	81
[그림-35] cosine panning 서브 패치	83
[그림-36] 공연 무대 사진 (측면)	84
[그림-37] 공연 시스템	87
[그림-38] 공연 무대 사진 (정면)	89
[그림-39] 무대 구성	97
[그림-40] A 섹션	98
[그림-41] B 섹션	99
[그림-42] C 섹션	100
[그림-43] D 섹션	101
[그림-44] E 섹션	102

I. 서론

1. 연구 목적 및 배경

본 논문은 리본¹⁾ 신스(ribbon synth)를 기반으로 한 신디사이저(synthesizer)와 테이프음악(tape-music) 그리고 시각적 요소를 융합하여 음악과 무용 그리고 미디어 아트(media art)를 결합한 새로운 형태의 공연을 제시하는 연구이다. 본 연구의 목적은 이러한 작품의 제작 및 공연 과정을 통해 디지털 인터페이스(digital interface)²⁾와 인간 감각의 비선형적 특성을 탐구하고 이를 바탕으로 현대 미디어 아트와 음악 창작에서 디지털 기술의 새로운 가능성을 제시하는 데 있다.

본 논문에서는 직접 제작한 리본 신스 악기를 중심으로 막형 전위차계(SoftPot membrane potentiometer)와 압력 센서(FSR, force sensitive resistor)를 활용하여 연주자의 터치와 압력을 신디사이저의 주요 파라미터로 실시간 제어하였다. 아두이노(Arduino)³⁾를 통해 입력 데이터를 Max/MSP⁴⁾로 전달하고 이를 통해 신디사이저의 음고(pitch), 필터(filter), 리버브(reverb), 음량(amplitude)등 다양한 요소를 조합함으로써 독창적이고 감각적인 테이프음악을 제작하였다. 이러한 음악적 요소는 터치디자이너(TouchDesigner)⁵⁾를 통해 시각적으로 확장되었으며 무용수가

1) 얇고 유연한 폴리에스터 필름으로 만들어지며 표면에는 저항성 물질이 코팅되어 있는 압력 센서

2) 사용자와 디지털 시스템 간의 상호작용을 가능하게 하는 물리적 또는 소프트웨어적 경로

3) 마이크로컨트롤러를 기반으로 한 오픈소스 전자 플랫폼

4) Cycling'74에서 개발한 비주얼 프로그래밍 언어 및 개발 환경

움직임에 따라 음악과 동기화된 선과 잔상이 변화하는 시각적 연출을 구현하였다. 작품은 음악과 영상, 무용이 실시간으로 상호작용하며 관객에게 다감각적 몰입을 제공하는 미디어 아트 공연으로 완성되었다.

연구의 또 다른 목적은 인간 감각의 선형적 특성과 비선형적 특성에 대한 분석과 이를 디지털 인터페이스에 반영하는 방법을 탐구하는 것이다. 기존의 디지털 악기와 인터페이스는 보통 선형적인 데이터 처리 방식을 사용하며 이는 인간 감각의 비선형적 반응과 불일치하여 감각적 몰입을 저해할 수 있다. 예를 들어 압력 센서에서 출력되는 데이터는 일반적으로 선형적이지만 인간은 압력 강도에 대해 로그 스케일⁶⁾과 같은 비선형적인 방식으로 반응한다. 본 연구에서는 이 같은 차이를 보완하기 위해 아두이노에서 센서 데이터를 로그 스케일로 변환하여 Max/MSP로 전달하는 방식을 적용하였다. 이를 통해 연주자는 감각적으로 더 자연스럽게 정교한 음악적 표현을 가능하게 했다.

본 작품의 의도는 이러한 기술적 과정을 기반으로 음악과 시각적 요소가 유기적으로 결합된 공연을 통해 디지털 기술과 인간 감각의 새로운 접점을 탐구하는 데 있다. <Splinters of Light: 빛의 파편>이라는 제목처럼 음악과 시각적 요소가 각각의 조각처럼 상호작용하며 전체적인 경험을 완성하는 데 초점을 맞추었다. 리본 신스를 통한 연주는 단순한 연주를 넘어 음악적 데이터와 시각적 데이터를 동시에 생성하여 관객과 실시간으로 상호작용할 수 있는 새로운 형태의 공연 예술을 제안하였다.

5) Derivative사의 노드 기반 비주얼 프로그래밍 소프트웨어

6) 값의 크기가 기하급수적으로 증가하거나 감소하는 데이터를 표현하기 위해 사용되는 비선형 척도

2. 사례 연구

Korg⁷⁾는 리본 센서를 활용한 다양한 신디사이저를 개발하여 음악가들에게 독창적인 표현 방식을 제공하고 있으며 이는 현대 음악 창작과 퍼포먼스에서 중요한 역할을 하고 있다.

Korg Monotron 시리즈는 아날로그 리본 신디사이저로 휴대성이 뛰어나고 직관적인 리본 컨트롤러를 통해 다양한 음색 변화를 가능하게 한다. 특히 Monotron Delay 모델은 딜레이(delay)효과⁸⁾를 내장하고 있어 독특한 사운드 디자인을 구현할 수 있다. Monotron은 즉흥 연주에서 리본 컨트롤러를 활용하여 멜로디와 효과음을 생성하며 라이브 퍼포먼스에서 독특한 사운드스케이프를 창출하는 데 유용하다. 또한 딜레이 효과를 활용하여 공상과학 영화나 게임의 사운드트랙 제작 시 독창적인 음향 효과를 구현할 수 있다.



[그림-1] Korg Monotron⁹⁾

7) 일본의 전자 악기 및 음향 장비 제조사

8) 오디오 신호를 일정 시간 지연시켜 원래 신호와 반복적으로 재생함으로써 에코(반향) 효과를 생성하는 오디오 프로세싱 기술

Korg Monotribe는 리본 컨트롤러와 내장된 시퀀서를 통해 다양한 리듬과 멜로디를 생성할 수 있는 아날로그 리본 스테이션이다.[그림-2]

이 신디사이저는 VCO, VCF, LFO 등의 아날로그 회로를 통해 풍부한 음색을 출력하며 전자음악 제작에서 시퀀서와 리본 컨트롤러를 활용하여 베이스라인과 리드 사운드를 창작하는 데 적합하다. 또한 라이브 퍼포먼스에서 리본 컨트롤러를 이용해 실시간으로 음정을 변환하여 공연 중 다이내믹한 사운드 변화를 연출할 수 있다.



[그림-2] Korg Monotribe¹⁰⁾

9) www.korg.com/us/products/dj/monotron/

10) www.korg.com/us/products/dj/monotribe/index.php

Korg의 리본 센서 기반 신디사이저는 음악가들에게 새로운 표현 가능성을 열어주며 현대 음악과 퍼포먼스에서 다채로운 예술적 창작 활동을 가능하게 하는 중요한 도구로 자리 잡고 있다.

본 논문은 이와 같은 리본 센서 기반의 신디사이저들이 제시하는 가능성을 기반으로 막형 전위차계와 압력 센서를 활용하여 새롭게 설계된 리본 신스 악기와 이를 이용한 퍼포먼스를 제안한다. 특히 Max/MSP를 통해 소리의 음정, 음색, 효과를 실시간으로 조작하는 인터페이스를 구현하고 이를 연주자의 동작과 직접적으로 연계시켜 공연 환경에서의 실시간 상호작용을 강화하였다. 이러한 접근은 Korg 신디사이저의 창의적 사용 사례를 발전시킨 형태로 디지털 인터페이스와 인간 감각의 비선형적 특성을 융합하여 음악적 표현의 새로운 가능성을 탐구하는 데 도움을 준다.

3. 기존 연구와 차별성

기존의 연구는 주로 음악적 인터페이스에 초점을 맞췄지만 실시간 음악적 표현과 시각적 표현을 동시에 다루는 시스템에 대한 연구는 아직 충분하지 않다. 본 연구는 Max/MSP와 터치디자이너를 통합하여 감각적 피드백을 강화하고 음악과 시각적 표현이 실시간으로 상호 작용하는 다중 감각적 아트를 창조한다.

II. 연구에 관한 이론적 배경

1. 인간 감각의 비선형적 특성과 음악적 표현

베버-페히너 법칙(Weber-Fechner Law)¹¹⁾에 따라 인간의 감각은 비선형적이다. 이 논문에서는 막형 전위차계(SoftPot membrane potentiometer)와 압력 센서(FSR, force sensitive resistor)를 사용하여 물리적 입력이 어떻게 비선형적 감각에 의해 인식되는지 설명하고 음악적 표현에서의 비선형적 데이터 처리 방식에 대해 논의한다.

베버-페히너 법칙은 인간의 감각이 물리적 자극의 변화에 어떻게 반응하는지를 설명하는 심리물리학(psychophysics)¹²⁾의 핵심 이론이다.

이 법칙에 따르면 감각의 강도는 자극의 강도에 대한 로그 함수(logarithmic function)¹³⁾로 표현되며 이는 자극의 변화가 일정 비율 이상이어야만 감각적으로 인지된다는 것을 의미한다.

예를 들어 어두운 방에서 작은 빛의 변화는 쉽게 감지되지만 밝은 대낮에는 동일한 빛의 변화가 거의 느껴지지 않는다. 이는 감각이 자극의 절대적인 크기보다는 상대적인 변화에 민감하게 반응함을 보여준다.

11) 에른스트 하인리히 베버(Ernst Heinrich Weber, 1795 - 1878)와 구스타프 페히너(Gustav Theodor Fechner, 1801 - 1887)는 심리물리학의 기초를 세운 독일의 학자

12) 물리적 자극과 이에 대한 인간의 감각적, 심리적 반응 사이의 관계를 연구하는 학문

13) 특정 값을 기준이 한 지수의 역함수로 증가율이 급격히 감소하는 비선형적 관계

수학적으로 베버-페히너 법칙은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\Delta I}{I} = K^{14)}$$

<표-1> 베버-페히너 법칙 수식

ΔI	감지 가능한 최소 변화량(최소감지차이, JND)
I	원래 자극의 강도
K	베버 상수 (자극 종류에 따라 상이)

베버-페히너 법칙을 확장하여 자극 강도와 감각 강도 사이의 관계를 로그 함수로 설명했다.

$$S = K * \log(I)^{15)}$$

<표-2> 베버-페히너 법칙에 로그 함수 적용 수식

S	감각의 강도
I	자극의 강도
K	상수

14) David Halliday, Robert Resnick, and Jearl Walker, Fundamentals of Physics, Wiley, 10th Edition, 2013.

15) Stanley Smith Stevens, Psychophysics: Introduction to its Perceptual, Neural and Social Prospects, Wiley, 1975.

이 법칙은 JND(just noticeable difference, 최소감지차이)¹⁶⁾를 기반으로 하며 인간 감각이 자극의 절대적인 크기보다는 상대적인 변화에 민감하게 반응함을 보여준다.

JND는 두 자극 사이에서 차이를 감지할 수 있는 최소한의 변화량을 나타낸다. 이는 JND가 자극의 강도에 비례한다는 베버-페히너 법칙과 일치한다. 음악적 맥락에서도 JND는 비선형적 감각 특성에 중요한 역할을 한다.

가. 음량 조절: 작은 음량에서는 미세한 변화도 잘 인지되지만 큰 음량에서는 동일한 변화가 상대적으로 덜 느껴진다.

나. 음고 변화: 낮은 주파수에서는 작은 변화도 감지되지만 높은 주파수에서는 더 큰 변화가 있어야 구별할 수 있다.

JND와 베버-페히너 법칙은 디지털 음악 인터페이스 설계에서 중요한 원칙으로 작용한다. 인간 감각의 비선형적 특성을 반영하여 인터페이스를 설계하면 더 직관적이고 자연스러운 경험을 연출한다.

16) 두 자극 간의 차이를 인간이 감지할 수 있는 최소한의 변화량

<표-3> 인간 감각의 비선형적 특성을 반영한 인터페이스 특성

음량 슬라이더(amplitude ¹⁷⁾)	필터 커팅 주파수(cut-off frequency ¹⁸⁾)
직선적 변화 대신 로그 스케일로 설계하면 작은 음량에서 세밀한 조정이 가능하고 큰 음량에서는 안정적인 조정이 가능	입력을 로그 스케일로 변환하면 인간의 청각 특성에 맞춰 자연스러운 조정이 가능

또한 음악적 표현에서 JND는 감각적 미세 조정의 핵심이다.

가. 피아니스트는 건반을 누르는 힘의 작은 차이를 통해 음색과 볼륨을 조절한다.

나. 본 논문에서는 막형 전위차계와 압력 센서를 이용해 미세한 조정을 가능하게 하는 인터페이스를 구현할 수 있다.

17) 파동이나 신호에서 진동의 최대 크기를 나타내는 값

18) 필터에서 신호를 차단하기 시작하거나 감쇠가 시작되는 주파수

2. 디지털 인터페이스 기술:막형 전위차계와 압력 센서 개요

막형 전위차계와 압력 센서의 기술적 원리와 작동 방식을 상세히 설명한다. 두 센서의 물리적 위치와 압력 변화를 실시간으로 처리하여 음악적 데이터를 생성하는 방법을 논의하며 선형적 출력과 시리얼 통신(serial communication)¹⁹⁾을 통한 데이터 전송 구조를 설명 논의한다.

이는 물리적 위치와 압력을 감지하여 이를 전기적 신호로 변환하는 장치로 각각의 동작 원리는 특정 물리적 현상에 기반을 두고 있다. 본 연구는 이러한 센서 데이터의 처리와 전송 과정을 수학적으로 모델링하고 이를 디지털 인터페이스에서 실시간으로 활용하는 방법을 제시한다.

1) 물리적 모델링

(1) 막형 전위차계(SoftPot membrane potentiometer)

얇은 필름 형태의 저항 소자로 특정 위치를 터치하면 해당 지점의 저항값이 변한다.

저항값은 센서의 길이를 기준으로 상대적 위치를 나타낸다.

19) 데이터를 한 비트씩 순차적으로 전송하는 방식

<표-4> 막형 전위차계의 입력과 출력

입력	물리적 위치 x (터치지점, $0 \leq x \leq L$)
출력	전압 V_{out} (전압 분배 법칙을 통한 계산)

① 수학적 모델

$$V_{out} = V_{in} \cdot \frac{R(x)}{R_{total}} \text{ } ^{20)}$$

<표-5> 막형 전위차계의 수학적 모델 수식

V_{in}	입력 전압
$R(x)$	터치 지점까지의 전압
R_{total}	전체 저항

② 선형적 출력

물리적 위치와 출력 전압 간에 선형적인 관계를 가진다.
이는 아래와 같은 데이터 매핑에 유리하다.

$$V_{out} \propto x \text{ } ^{21)}$$

이로 인해 터치 위치에 따라 주파수나 피치와 같은 음악적 파라미터를 선형적으로 매핑할 수 있다.

20) Alexander, C. K., & Sadiku, M. N. O., Fundamentals of Electric Circuits, McGraw-Hill Education, 6th Edition, 2017.

21) Floyd, T. L., Electronic Devices, Pearson Education, 9th Edition, 2013.

(2) 압력 센서(FSR, force sensitive resistor)

압력에 따라 저항값이 변화하는 소자²²⁾로 적용된 힘의 크기를 측정한다. 압력이 증가할수록 저항은 비선형적으로 감소하며 출력 전압은 압력에 따라 변한다.

<표-6> 압력 센서의 입력과 출력

입력	압력 P (힘, $P \geq 0$)
출력	전압 V_{out} (전압 분배 법칙을 통한 계산)

① 수학적 모델

$$R(P) \propto \frac{1}{P}, V_{out} = V_{in} \cdot \frac{R_{fsr}}{R_{fsr} + R_{fixed}} \quad 23)$$

<표-7> 막형 전위차계의 수학적 모델 수식

R_{fsr}	입력에 따른 가변 저항
R_{fixed}	고정 저항

② 비선형적 출력

압력과 출력 전압 사이의 관계는 비선형적이므로 이를 선형적 데이터로 변환하기 위해 로그 스케일 매핑과 같은 변환 방식을 적용한다.

22) 전기, 전자 회로에서 특정한 기능을 수행하는 기본 단위나 부품

23) Bolton, W. Mechatronics: Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering, Pearson Education, 6th Edition, 2015.

2) 수학적 데이터 처리 및 매핑

센서에서 생성된 아날로그 신호는 아두이노를 통해 디지털화되어 시리얼 통신으로 전송된다. 이 데이터는 음악적 제어를 위해 적절히 변환되고 매핑된다.

(1) 디지털 변환

아날로그 입력(0~1023, 10-bit ADC²⁴)을 디지털 신호로 변환.

$$D = \frac{A_{in}}{A_{max}} \cdot D_{max}^{25)}$$

<표-8> 아날로그에서 디지털 변환 수식

A_{in}	입력 아날로그 값
A_{max}	아날로그 최대 값(1023)
D_{max}	디지털 출력 범위

24) Analog-to-Digital Converter

25) Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2014). Numerical Methods for Engineers (7th ed.).

(2) 음악적 데이터 매핑

① 막형 전위차계의 위치 데이터를 주파수나 피치로 매핑.

$$f(x) = f_{min} + \left(\frac{x}{L}\right) \cdot (f_{max} - f_{min})^{26)}$$

<표-9> 막형 전위차계의 위치 데이터를 주파수로 매핑 수식

f_{min}	최소 주파수
f_{max}	최대 주파수

② 압력 센서의 데이터를 볼륨이나 필터 커팅 주파수로 매핑.

$$g(P) = \log(P+1) \cdot k^{27)}$$

<표-10> 압력 센서 데이터를 필터 커팅 주파수로 매핑 수식

k	스케일링 상수
-----	---------

26) Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2014). Numerical Methods for Engineers (7th ed.).

27) Kreyszig, E. (2011). Advanced Engineering Mathematics (10th ed.).

3) 시리얼 통신을 통한 데이터 전송

센서 데이터는 아두이노에서 처리되어 Max/MSP로 전송된다. 이 과정은 다음과 같은 구조를 따른다.

(1) 시리얼 프로토콜²⁸⁾

- ① 데이터 패킷 형식 : [SoftPot, FSR]
- ② 전송 속도 : 9600bps²⁹⁾ (표준 시리얼 통신 속도)

(2) Max/MSP에서의 데이터 처리

- ① serial오브젝트를 사용해 데이터를 수신하고 unpack오브젝트를 통한 분리된 채널로 전달.
- ② 각 채널은 음악적 매핑을 통해 주파수, 음량, 필터 등에 실시간으로 적용된다.

28) 시리얼 통신에서 데이터 전송의 형식과 규칙을 정의하는 표준

29) bps(bits per second)는 초당 전송되는 비트 수를 나타내는 데이터 전송 속도의 단위

3. 음악적 표현과 물리적 상호작용의 통합

위 모델링을 통해 생성된 데이터는 Max/MSP에서 음향적으로 구현되며 터치디자이너에서 시각적으로 표현된다. 이러한 통합 시스템은 물리적 위치와 압력의 변화가 음악적 데이터로 변환되고 실시간으로 음악과 비주얼로 표현되는 과정에서 인간 감각과 디지털 기술 간의 상호작용을 가능하게 한다.

이를 통해 리본 신스 악기는 디지털 인터페이스 설계에 있어 물리적 데이터를 활용한 음악적 표현의 새로운 가능성을 제시하며 인간 감각의 복잡성과 비선형성을 디지털 환경에 통합하는 접근 방식을 제안한다.

4. 인터랙티브 음악과 디지털 기술의 융합

본 논문은 Max/MSP와 터치디자이너를 결합하여 음악적 입력을 실시간으로 시각적 표현으로 변환하는 방법을 설명하고 이 결합을 통해 인터랙티브(interactive)³⁰⁾ 퍼포먼스에서 시각과 청각이 어떻게 상호 작용하는지에 대한 이론적 배경을 설명한다.

30) 사용자와 시스템이 서로 영향을 주고받으며 실시간으로 상호작용하는 특성

Ⅲ. 기술 연구

1. 하드웨어 악기와 소프트웨어의 통합 설계

1) 하드웨어 구성

아두이노를 통해 막형 전위차계와 압력 센서 데이터를 실시간으로 처리하고 Max/MSP로 전달하는 방법을 다룬다. 센서 데이터가 어떻게 사운드를 제어할 수 있는지 회로 설계와 연결 방식을 설명한다.

막형 전위차계를 활용하여 터치 위치를 기반으로 음정과 음색을 제어하는 전자 악기이다. 본 연구에서는 막형 전위차계(SoftPot membrane potentiometer)와 압력 센서(FSR, force sensitive resistor)를 활용하여 LED³¹⁾와 음악적 출력이 상호작용하는 리본 신스를 제작하는 과정을 다룬다. LED는 터치 위치 및 압력 데이터에 따라 시각적 피드백을 출력하여 연주자가 물리적 입력을 더욱 직관적으로 이해할 수 있도록 돕는다.

31) LED(Light Emitting Diode), 전류가 흐를 때 빛을 방출하는 반도체 소자

(1) 아두이노를 사용해 막형 전위차계와 압력 센서를 Max/MSP
와 연결하는 기술적 설명

아두이노는 센서 데이터를 아날로그 신호로 받아들이고
이를 Max/MSP로 전달하는 역할을 한다.

① 하드웨어 목록

가. 아두이노 우노(Arduino Uno)³²⁾ 모델

나. 막형 전위차계(SoftPot)

다. 압력 센서(FSR)

라. LED 스트립

마. 저항³³⁾

바. 커패시터³⁴⁾

사. 브레드보드³⁵⁾ 및 점퍼 케이블³⁶⁾

32) 마이크로컨트롤러 보드, ATmega328P 칩을 기반으로 설계

33) 전기 회로에서 전류의 흐름을 제한하거나 제어하는 전자 부품

34) 전하를 저장하고 방출하는 전자 부품

35) 전자 회로를 임시로 구성하거나 테스트하기 위해 사용되는 도구

36) 전자 회로를 연결하기 위해 사용되는 전선

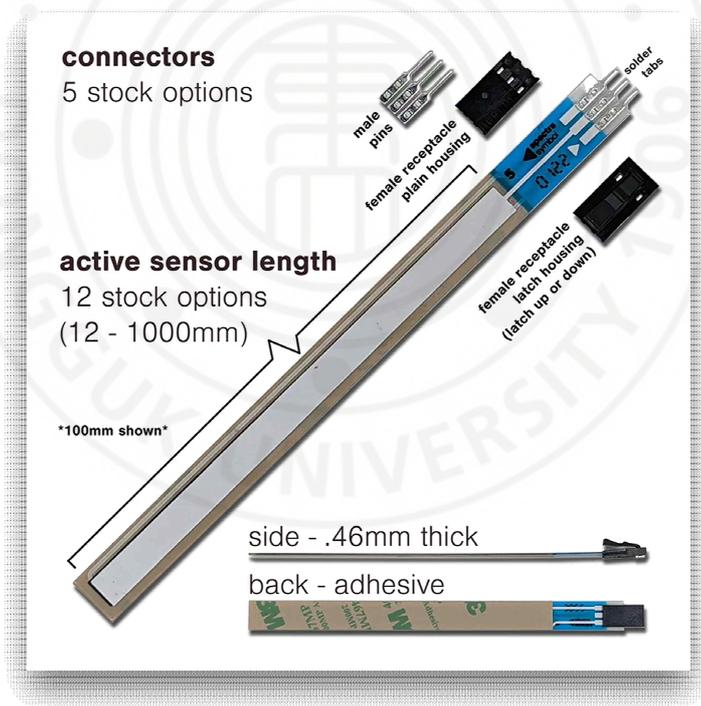
② 막형 전위차계와 아두이노 우노 연결

막형 전위차계의 세개 핀을 아두이노 우노의 아날로그 입력 핀과 전원 핀에 연결.

가. VCC³⁷⁾(+): 아두이노 우노 5V 핀에 연결.

나. GND³⁸⁾(-): 아두이노 우노 GND 핀에 연결.

다. signal(입력): 아두이노 우노 A0 핀에 연결.



[그림-3] 막형 전위차계³⁹⁾

37) Voltage at the Common Collector

38) ground의 약자로 전기 회로에서 기준 전위 또는 접지

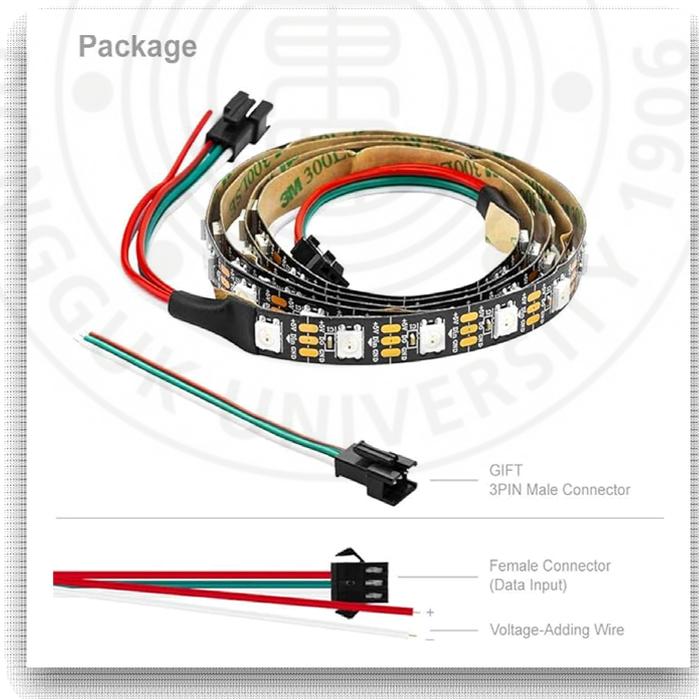
39) www.spectrasymbol.com/linear-position-sensors

아두이노 우노는 막형 전위차계에서 발생하는 아날로그 데이터를 읽고 이를 디지털화하여 연주자가 터치한 위치에 따른 데이터를 생성.

③ LED와 아두이노 우노 연결

가. LED의 긴 핀(양극, +)을 브레드보드에 연결하고 이를 220Ω ⁴⁰⁾ 저항을 통해 아두이노 우노의 PWM⁴¹⁾ 핀(D9)에 연결.

나. LED의 짧은 핀(음극, -)을 아두이노 우노의 GND 연결.



[그림-4] LED 스트립⁴²⁾

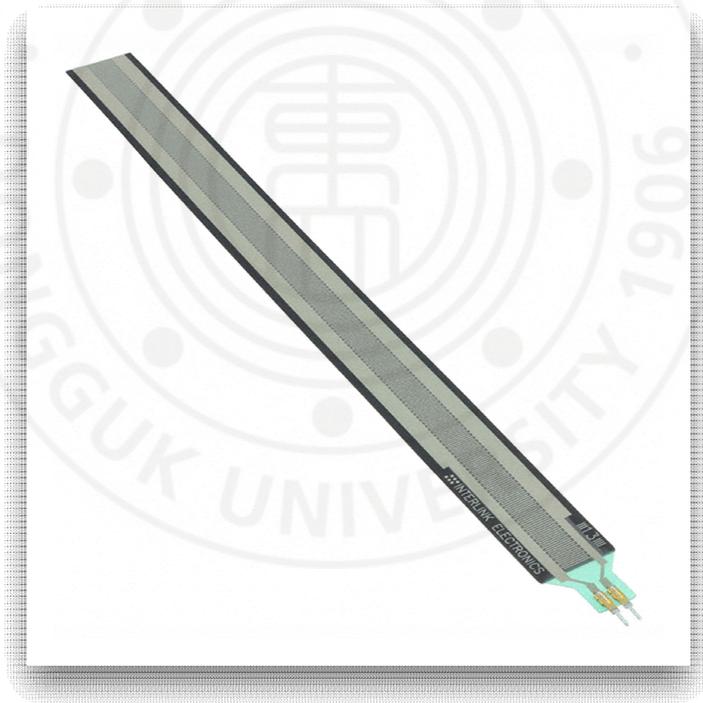
40) ohm을 나타내는 기호로 저항의 단위

41) Pulse Width Modulation, 펄스 폭 변조

④ 압력 센서와 아두이노 우노 연결

가. 압력 센서의 한쪽 핀을 아두이노 우노의 A1 핀에 연결하고 다른 핀을 10k Ω pulldown 저항을 통해 GND에 연결.

나. 아두이노 우노는 압력 센서의 저항 변화를 아날로그 입력으로 읽어 압력 데이터를 처리.



[그림-5] 압력 센서⁴³⁾

42) <https://botswana.desertcart.com/products/45883923-btf-lighting-ws-2812-b-60-leds-60-pixels-flexible-black-pcb-individually-addressable-led-strip-dream-color-non-waterproof-dc-5-v-3-2-ft-1-m>

43) <https://www.jakelectronics.com/productdetail/interlinkelectronics-3400070-1833151>

⑤ 막형 전위차계와 풀다운(pulldown) 저항

가. 안정적 데이터 처리를 위한 설계 및 구현

막형 전위차계는 위치에 따라 저항값이 변하는 센서로 풀다운 저항을 추가하면 신호 안정성을 높이고 터치하지 않을 때 발생할 수 있는 부동 상태를 방지할 수 있다.

<표-11>은 막형 전위차계와 풀다운 저항을 활용하여 안정적인 데이터 처리를 구현하는 방법을 설명한다.

풀다운 저항은 터치가 없을 때 출력 전압이 부동 상태(floating)⁴⁴가 되는 것을 방지하는 역할을 한다.

<표-11> 풀다운(pulldown) 저항의 문제와 해결

부동 상태 문제	터치가 없을 때 막형 전위차계의 출력 핀은 연결되지 않아 신호가 불안정하거나 노이즈에 민감해진다.
풀다운 저항 해결	출력 핀을 GND에 연결하여 터치가 없을 때 출력 전압이 안정적으로 0V가 되도록 한다. 일반적으로 10kΩ 저항을 사용하여 적절한 전류 소모와 안정성을 유지한다.

44) 특정 단자가 전압 기준(예:GND)이나 명확한 전위와 연결되지 않은 상태

나. 막형 전위차계와 풀다운(pulldown) 저항 그래프 [그림-6]

가) 축의 의미

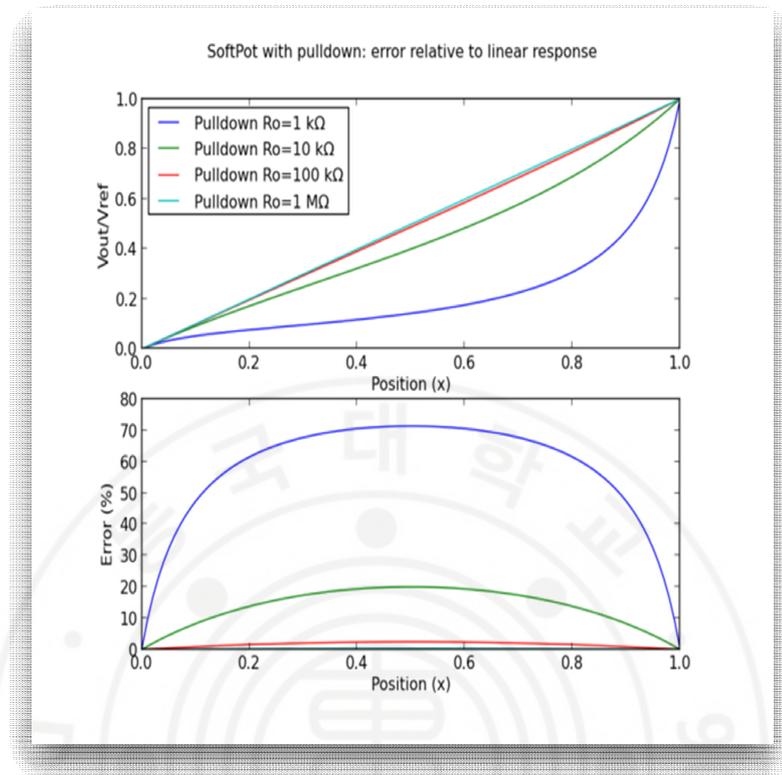
(가) X축 (touch position): 막형 전위차계의 터치 위치를 나타냄. 센서의 길이(예: 070cm 또는 0100%)를 기준으로 설정.

(나) Y축 (output voltage): 터치 위치에 따라 변화하는 출력 전압 (V_{out}), 보통 0V에서 입력 전압(V_{in} , 예: 5V) 사이의 값.

⑥ 그래프의 형태

가. 선형 구간: 터치 위치가 일정한 비율로 이동함에 따라 출력 전압이 선형적으로 증가. 이는 막형 전위차계의 선형적 전압 출력 특성을 반영.

나. 그래프는 보통 원점(0V, 0%)에서 시작하여 터치 위치의 최종점(5V, 100%)까지 선형적으로 증가.



[그림-6] 막형 전위차계 저항에 따른 선형 반응⁴⁵⁾

⑦ 풀다운 효과

가. 풀다운 저항이 없는 경우: 터치하지 않을 때 그래프가 부동 상태로 나타날 수 있으며 X축 근처에서 불안정하거나 노이즈를 포함한 신호를 보여줌.

나. 풀다운 저항이 있는 경우: 터치하지 않을 때 출력 전압이 안정적으로 0V로 유지되며 터치 입력이 없을 때 신호의 정확성이 향상됨.

45) Matplotlib를 사용하여 풀다운 저항이 있는 소프트팟 출력의 선형성 오류를 플로팅

⑨ 동작 원리

가. 사용자가 막형 전위차계를 터치하면 터치 위치에 따라 아두이노 우노가 음정을 생성.

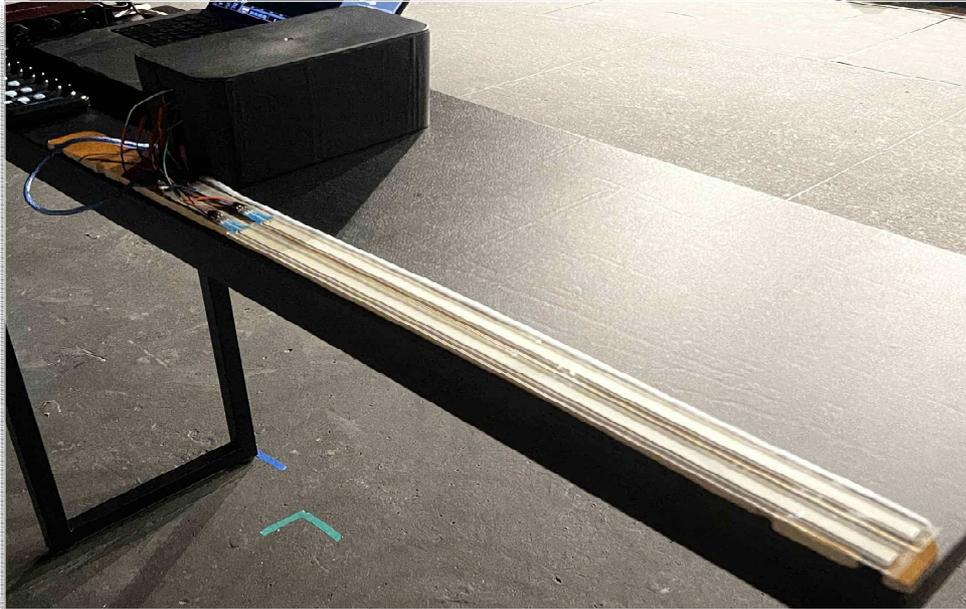
나. 동시에 압력 센서를 눌렀을 때 압력 강도에 따라 LED의 밝기가 변하며 시각적 피드백 연출.

다. 이 데이터는 Max/MSP로 전송되어 더 정교한 음악적 및 시각적 효과를 구현.

라. 막형 전위차계의 위치 데이터는 음정 조정에 성공적으로 매핑되었으며 연주자가 실시간으로 피치 변화를 직관적으로 제어 가능.

바. 압력 센서의 입력은 LED 밝기 변화와 효과적으로 동기화되어 시각적 피드백의 직관성을 강화.

전체 시스템은 물리적 입력과 디지털 출력을 효과적으로 통합하여 실시간 상호작용을 지원한다.



[그림-8.1] 리본 신스 악기 완성본



[그림-8.2] 리본 신스 악기 완성본

2) 소프트웨어 설계

(1) 아두이노 IDE(integrated development environment)⁴⁶⁾ 코드 작성

[그림-9]의 아두이노 IDE에서는 막형 전위차계와 압력 센서로부터 아날로그 데이터를 읽고 이 데이터를 Max/MSP로 전달하여 합한다. 이 작업은 시리얼 통신(serial communication)을 통해 이루어진다. 다음은 아날로그 핀에서 데이터를 읽어 시리얼로 전송하는 기본적인 코드이다.

```
1  아날로그 데이터를 읽어 Max/MSP로 전달하는 기본 코드
2
3  // 핀 설정
4  const int softPotPin = A0; SoftPot 센서 핀 (아날로그 입력)
5  const int fsrPin = A1; 압력(FSR) 센서 핀 (아날로그 입력)
6
7  // 주요 변수
8  int softPotValue = 0; SoftPot 센서 값
9  int fsrValue = 0; FSR 센서 값
10
11 void setup() {
12     // 시리얼 통신 시작
13     Serial.begin(9600);
14
15     // 핀 설정
16     pinMode(softPotPin, INPUT);
17     pinMode(fsrPin, INPUT);
18 }
19
20 void loop() {
21     SoftPot 센서 값 읽기 (0 ~ 1023)
22     softPotValue = analogRead(softPotPin);
23
24     FSR 센서 값 읽기 (0 ~ 1023)
25     fsrValue = analogRead(fsrPin);
26
27     Max/MSP 데이터 전송
28     Serial.print("SoftPot:");
29     Serial.print(softPotValue);
30     Serial.print("\tFSR:");
31     Serial.println(fsrValue);
32
33     // 반복 속도 조절
34     delay(10);
```

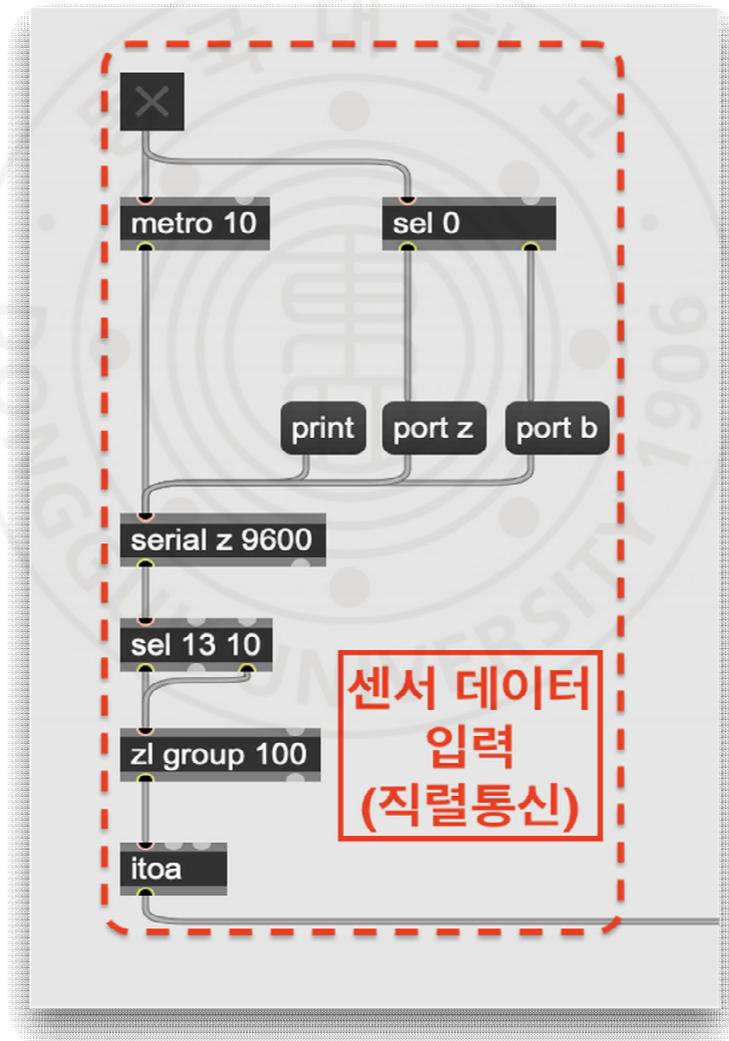
[그림-9] 센서 데이터 시리얼 통신 기본 코드

46) 소프트웨어 개발을 위한 도구들을 하나의 인터페이스에 통합한 환경

(2) Max/MSP에서 데이터 수신

Max/MSP에서 아두이노로부터 전송된 시리얼 데이터를 수신하여 이를 실시간으로 제어 가능한 값으로 변환해야 한다.

① Max/MSP 설정



[그림-10] Max/MSP 시리얼 데이터 수신 패치

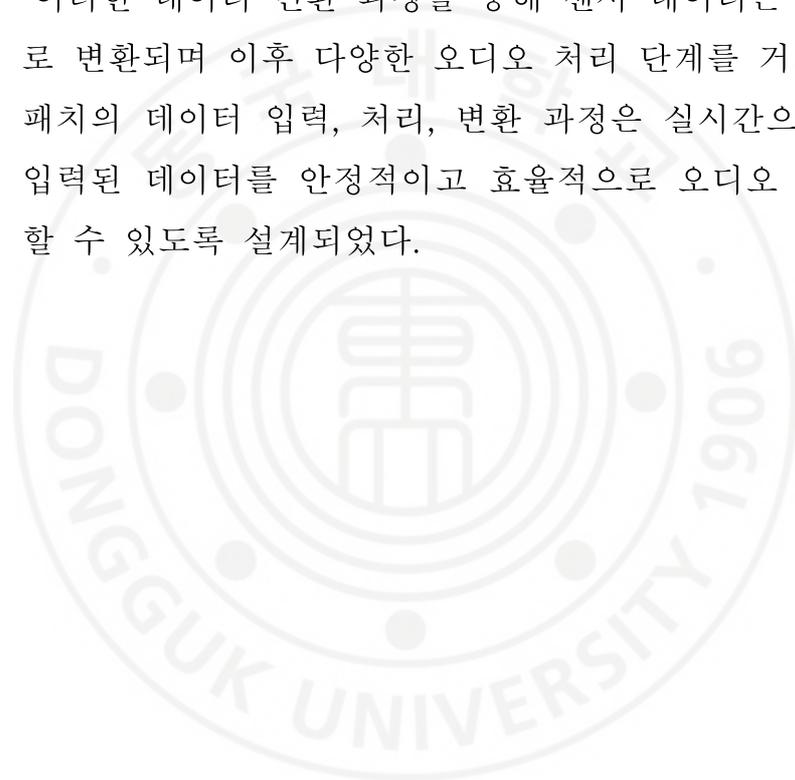
[그림-10]의 패치는 센서를 통해 입력된 데이터를 기반으로 오디오 신호를 처리하고 생성하는 구조로 설계되었다. 센서 데이터는 시리얼 통신을 통해 전달되며 데이터의 안정성과 정확성을 보장하기 위한 필터링과 변환 과정을 거쳐 오디오 신호로 변환된다. 입력 단계에서는 serial z 9600 오브젝트를 사용하여 시리얼 포트에서 데이터를 읽는다.

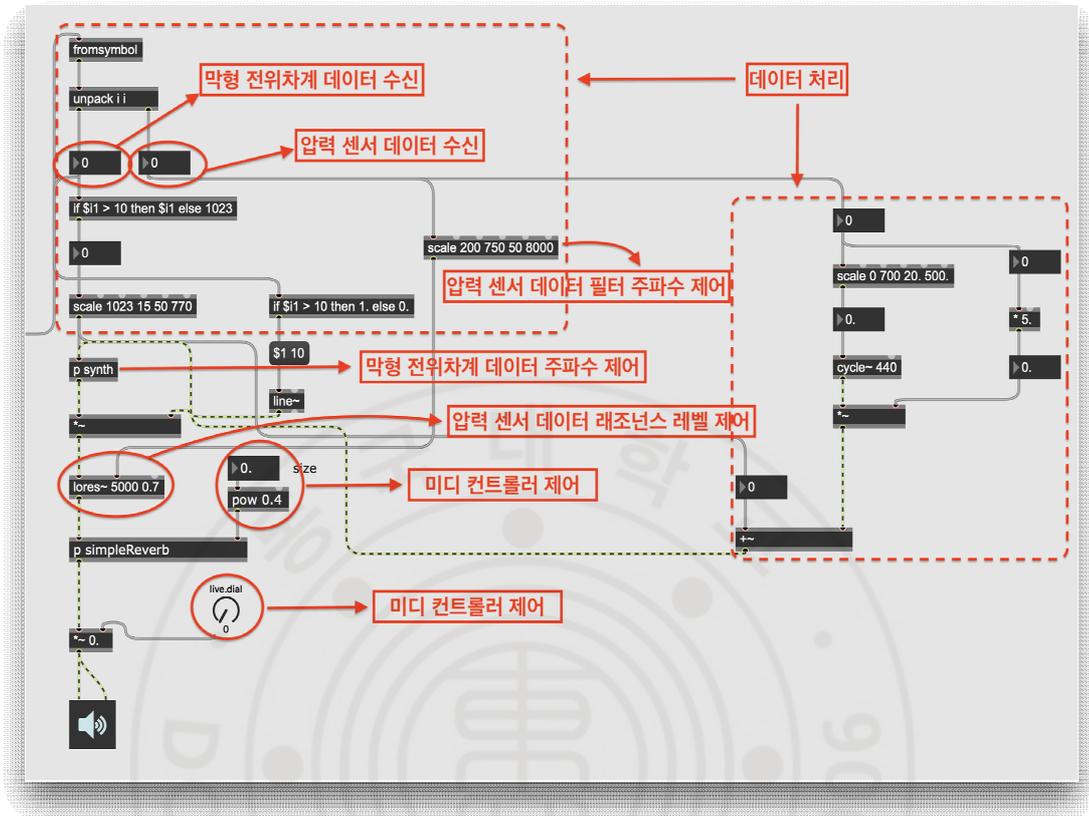
이 오브젝트는 9600bps 속도로 데이터를 처리하며 센서에서 전송된 값을 수신한다. 데이터는 z1 group 오브젝트를 통해 한 번에 100개의 데이터로 그룹화되어 처리되며 itoa 오브젝트를 사용하여 숫자 데이터를 텍스트로 변환한다. 텍스트 변환은 디버깅 및 데이터 시각화를 위한 목적으로 활용된다. 데이터는 metro 오브젝트를 통해 10ms 간격으로 지속적으로 요청 및 처리되며 sel 오브젝트를 통해 특정 값 (13 또는 10)을 선택하여 필터링된다. 이 필터링 과정은 센서 데이터의 정확성을 유지하고 노이즈를 제거하기 위한 것이다.

처리된 데이터는 fromsymbol 오브젝트를 통해 텍스트 데이터를 숫자로 변환하여 신호 처리에 적합한 형태로 변환된다. 변환된 데이터는 unpack을 사용하여 개별 값으로 분리되며 이를 통해 두 개의 입력 데이터를 각각 독립적으로 처리할 수 있다. 데이터 안정성을 보장하기 위해 if \$i1 > 10 then \$i1 else 1023 조건문이 사용되며 입력 값이 10보다 큰 경우 해당 값을 그대로 사용하고 그렇지 않으면 1023으로 고정한다. 이러한 조건은 센서 데이터가 너무 낮거나 비정상적인 값을 가질 때 이를 방지하는 역할을 한다.

센서 데이터는 scale오브젝트를 사용하여 특정 범위로 매핑된다. 예를 들어 scale 1023 15 50 770은 0에서 1023 사이의 센서 데이터를 15에서 770 사이로 변환한다. 이는 입력 데이터를 오디오 신호의 주파수, 진폭, 또는 필터의 매개변수로 활용할 수 있도록 조정하는 중요한 과정이다.

이러한 데이터 변환 과정을 통해 센서 데이터는 오디오 신호로 변환되며 이후 다양한 오디오 처리 단계를 거쳐 출력된다. 패치의 데이터 입력, 처리, 변환 과정은 실시간으로 동작하며 입력된 데이터를 안정적이고 효율적으로 오디오 신호로 변환할 수 있도록 설계되었다.





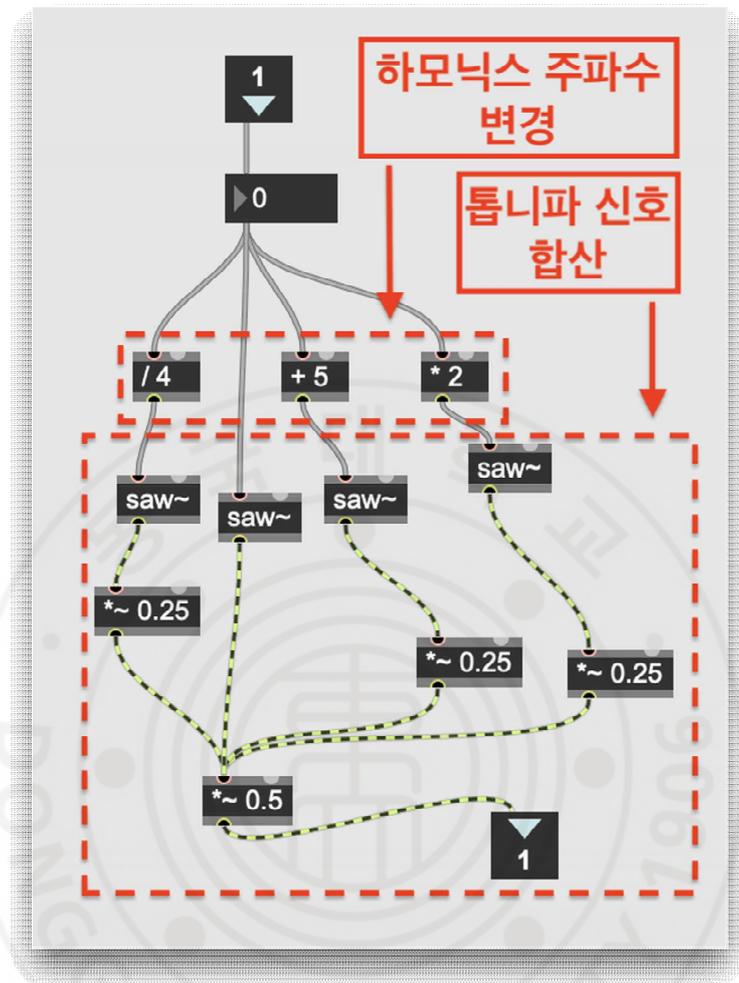
[그림-11] 오디오(audio) 생성 패치

[그림-11]의 패치는 막형 전위차계 센서와 압력 센서를 기반으로 입력 데이터를 받아 오디오 신호를 생성하고 리버브 (reverb)⁴⁷⁾ 효과와 필터링을 통해 공간감 있는 소리를 출력하도록 설계된 시스템이다. 입력된 센서 데이터는 시리얼 통신을 통해 전달되며 데이터를 안정적으로 처리하고 변환하여 오디오 신호에 반영한다. 이 패치에서는 Korg Nano Kontrol2 MIDI 컨트롤러를 활용하여 리버브의 공간 크기와 최종 소리의 크기를 실시간으로 제어할 수 있다.

47) 소리가 공간에서 반사되어 생성되는 잔향 효과

시리얼 통신으로 수신된 데이터는 serial z 9600 오브젝트를 통해 처리되며 9600bps 속도로 데이터를 안정적으로 읽는다. 데이터는 z1 group 100 오브젝트를 통해 한 번에 100개의 데이터를 그룹화하여 노이즈를 줄이고 신호의 안정성을 보장한다. 데이터의 가시화 및 디버깅을 위해 itoa오브젝트를 사용하여 숫자 데이터를 텍스트로 변환한다. metro 10 오브젝트는 10ms 간격으로 데이터를 요청하고 sel 13 10 오브젝트는 특정 값(13 또는 10)만 선택하여 필요한 데이터만 필터링한다. 이후 fromsymbol오브젝트는 텍스트 데이터를 숫자로 변환하며 변환된 데이터는 unpack i i 오브젝트를 통해 두 개의 개별 값으로 분리된다. 이 값은 각각 막형 전위차계 센서와 압력 센서에서 전달된 신호를 나타낸다.

막형 전위차계 센서의 신호는 `if $i1 > 10 then $i1 else 1023` 조건문을 통해 안정화된다. 이 조건문은 입력 값이 10보다 큰 경우 해당 값을 그대로 사용하고 그렇지 않으면 1023으로 고정하여 데이터의 유효성을 보장한다. 압력 센서와 막형 전위차계 센서에서 전달된 두 신호는 각각 scale를 통해 0~1023 범위를 오디오 신호에 적합한 값으로 매핑한다. 예를 들어 `scale 1023 15 50 770`은 센서 데이터를 오디오 신호의 주파수로 변환하고 필터 파라미터로 사용할 수 있도록 한다.



[그림-12] 오실레이터(oscillator) 패치

[그림-12]은 막형 전위차계 센서의 데이터는 p synth 서브패치로 전달된다. 이 서브패치는 다중 오실레이터(oscillator)⁴⁸⁾를 사용하여 복합적인 사운드를 생성하며 주파수 변조를 통해 다양한 음조를 구현한다. p synth 내부에서는 /4, +5, *2 오브젝트를 통해 입력 데이터를 연산하여 각기 다른 주파수를 생성하며 이를 기반으로 saw~오브젝트가 톱니파 신호를 생성한다.

48) 주기적으로 반복되는 전기 신호를 생성하는 장치, 발진기

톱니파 신호는 각각 *~ 0.25 오브젝트를 통해 진폭이 조정되고 모든 신호는 합산되어 단일 출력된다.

압력 센서의 데이터는 필터링 과정에 사용되며 lores~ 5000 0.7 오브젝트를 통해 저역 통과 필터링⁴⁹⁾을 수행한다. 압력에 따라 필터의 컷오프 주파수와 레조넌스(resonance)⁵⁰⁾가 실시간으로 조정되어 동적인 필터링 효과를 연출한다. 생성된 신호는 line~오브젝트를 통해 시간 기반의 선형 변화가 적용되며 pow 0.4 오브젝트를 통해 비선형적인 음향적 변화를 추가한다.



[그림-13] 리버브(reverb) 패치

49) 저역 통과 필터(low-pass filter)는 신디사이저에서 특정 컷오프 주파수 이하의 낮은 주파수 신호를 통과시키고 그 이상의 높은 주파수 신호를 감쇠시키는 필터

50) 필터의 컷오프 주파수 주변에 특정 주파수를 강조하거나 증폭시키는 기능

[그림-13]은 신호가 p simpleReverb 서브패치로 전달되어 잔향 효과를 추가한다. p simpleReverb는 여러 개의 comb~ 오브젝트를 사용하여 초기 반사를 생성하고 +~ 오브젝트를 통해 초기 반사를 합산하여 잔향의 밀도를 높인다. 이후 allpass~오브젝트를 통해 위상이 조정되어 부드러운 잔향 꼬리를 형성한다. 신호의 안정성을 유지하기 위해 clip~ 0.0 0.99 오브젝트를 사용하여 신호 진폭을 제한한다. 리버브의 공간 크기는 p simpleReverb의 오른쪽 입력으로 전달되는 신호에 의해 제어되며 이 신호는 Korg Nano Kontrol2 MIDI⁵¹⁾ 컨트롤러를 통해 실시간으로 조정된다.

리버브 처리가 완료된 신호는 *~ 오브젝트를 통해 최종 진폭이 조정되며 live.dial오브젝트를 통해 최종 출력 크기가 설정된다. live.dial은 MIDI 컨트롤러와 연동되어 실시간으로 소리의 크기를 직관적으로 조절할 수 있다. 최종적으로 처리된 신호는 dac~오브젝트를 통해 스피커로 출력된다.

이 패치는 센서 데이터를 기반으로 오디오 신호를 생성하고 필터링하며 리버브 효과를 통해 공간감을 부여하여 출력하는 체계적인 구조를 갖추고 있다. 막형 전위차계 센서의 입력은 오디오 신호의 주파수와 음정을 제어하며 압력 센서 입력은 필터링과 리버브 매개변수에 영향을 준다. 모든 과정은 실시간으로 동작하며 안정적이고 직관적인 인터페이스를 통해 다양한 음향 효과를 조절할 수 있도록 설계되었다. 이러한 시스템은 센서 데이터와 오디오 신호 처리 기술을 결합하여 동적이고 창의적인 사운드 디자인을 가능하게 한다.

51) Musical Instrument Digital Interface(MIDI)는 전자 악기와 컴퓨터 간의 데이터 통신을 위한 표준 프로토콜

② 아두이노 센서 데이터를 통한 실시간 음악 제어

이 시스템은 아두이노를 사용하여 막형 전위차계와 압력 센서에서 데이터를 읽고 이를 통해 음악의 다양한 파라미터를 실시간으로 제어하는 방식으로 설계되었다. 막형 전위차계는 터치 위치에 따라 피치(pitch)⁵²⁾, 주파수(frequency)⁵³⁾ 또는 이펙트 파라미터를 조절할 수 있으며 압력 센서는 압력의 세기에 따라 소리의 강약이나 필터의 컷오프 주파수를 제어하는 데 사용된다. 이 시스템은 Max/MSP와의 통합을 통해 실시간 연주와 상호작용을 가능하게 한다.

아두이노 코드는 두 가지 주요 센서 입력 데이터를 읽고 이를 Max/MSP와 통신하기 위해 설계되었다. 막형 전위차계는 터치 위치를 아날로그 값(0~1023)으로 출력하며 이 값은 음악 연주에서 피치나 주파수 변조와 같은 요소를 제어하는 데 사용된다. 예를 들어 막형 전위차계의 터치 값은 특정 주파수 범위로 매핑되어 연주자가 물리적으로 슬라이드하여 음높이를 조절할 수 있도록 한다. 압력 센서는 가해지는 압력의 강도를 아날로그 값으로 출력하며 이 값은 소리의 볼륨 조절 또는 필터 커팅 주파수의 실시간 제어에 활용된다. 압력이 강할수록 더 높은 출력값이 생성되며 이를 통해 연주자는 강약을 조절하거나 필터의 특성을 변형할 수 있다.

52) 소리의 높낮이를 나타내는 음향적 속성

53) 1초 동안 발생하는 진동 또는 파동의 횟수

```

1  리본 신스 Arduino 코드
2
3  // 핀 설정
4  const int softPotPin = A0; // SoftPot 센서 핀 (아날로그 입력)
5  const int fsrPin = A1;    // 압력 센서(FSR) 핀 (아날로그 입력)
6  const int ledPin = 9;    LED 핀 (PWM 출력)
7
8  // 주요 변수
9  int softPotValue = 0;    // SoftPot 센서 값
10 int fsrValue = 0;       // FSR 센서 값
11 int ledBrightness = 0;  LED 밝기 값
12
13 void setup() {
14     // 시리얼 통신 시작
15     Serial.begin(9600);  Max/MSP 연동 시리얼 통신
16
17     // 핀 모드 설정
18     pinMode(softPotPin, INPUT); // SoftPot 입력 핀
19     pinMode(fsrPin, INPUT);    // FSR 입력 핀
20     pinMode(ledPin, OUTPUT);   // LED 출력 핀
21 }
22
23 void loop() {
24     // SoftPot 센서 값 읽기 (0 ~ 1023)
25     softPotValue = analogRead(softPotPin);
26
27     // FSR 센서 값 읽기 (0 ~ 1023)
28     fsrValue = analogRead(fsrPin);
29
30     FSR 값을 LED 밝기로 매핑 (0 ~ 255)
31     ledBrightness = map(fsrValue, 0, 1023, 0, 255);
32
33     LED 밝기 출력 (압력에 따라 변화)
34     analogWrite(ledPin, ledBrightness);
35
36     // Max MSP로 데이터 전송 (SoftPot과 FSR 값)
37     Serial.print("SoftPot:");
38     Serial.print(softPotValue); // SoftPot 값 전송
39     Serial.print("\tFSR:");
40     Serial.println(fsrValue);   // FSR 값 전송
41
42     // 반복 속도 조절
43     delay(10); // 데이터를 빠르게 업데이트

```

[그림-14] 센서 데이터 시리얼 통신

[그림-14]는 아두이노 코드의 setup 함수는 초기화 작업을 수행한다. Serial.begin(9600) 명령은 아두이노와 Max/MSP 간의 시리얼 통신을 설정하여 데이터를 실시간으로 전달할 수 있도록 한다. pinMode 명령은 막형 전위차계과 압력 센서 핀을 입력으로 LED 핀을 출력으로 설정한다. 이 설정은 센서에서 입력 데이터를 읽고 LED를 통해 출력을 표현하는 기능을 지원한다.

loop 함수는 센서 데이터를 읽고 이를 처리하여 출력 신호로 변환하는 핵심 로직을 포함한다. analogRead 명령은 막형 전위차계와 압력 센서의 값을 읽으며 막형 전위차계의 출력값은 터치 위치를 나타내고 압력 센서의 출력값은 압력의 세기를 나타낸다. 읽은 압력 센서 값은 map 명령을 사용하여 0~255 범위로 매핑되며 이는 LED 밝기를 조절하거나 Max/MSP와의 통신에서 직관적인 데이터 표현을 가능하게 한다. LED는 analogWrite 명령을 사용하여 출력되며 센서 데이터의 변화에 따라 밝기가 실시간으로 변화한다.

센서 데이터는 Max/MSP로 전송되어 음악적 제어에 활용된다. Serial.print 명령을 사용하여 막형 전위차계와 압력 센서 데이터를 전송하며 각각 SoftPot:과 FSR:이라는 태그를 포함하여 데이터를 구분할 수 있도록 한다. 이러한 데이터는 Max/MSP 패치에서 해석되어 실시간으로 오디오 제어 값에 반영된다. 예를 들어 막형 전위차계의 데이터는 사운드의 피치를 변경하는데 사용되고 압력 센서의 데이터는 필터의 컷오프(cut-off) 주파수나 레조넌스(resonance)를 제어하는 데 사용될 수 있다.

연주자는 막형 전위차계를 슬라이드하여 음높이를 조절하며 이를 통해 멜로디를 생성하거나 이펙트 파라미터를 실시간으로 조정할 수 있다. 압력 센서는 연주자가 가하는 압력에 따라 음의 강약을 조절하거나 필터의 특성을 실시간으로 변경하는 데 사용된다. 이러한 상호작용은 아두이노와 Max/MSP 간의 원활한 통신을 통해 실시간으로 이루어지며 연주자는 물리적 제스처와 오디오 제어 값 간의 직관적인 연결을 경험할 수 있다.

이 시스템은 센서 데이터를 음악적 제어 값으로 매핑하고 이를 실시간으로 제어하는 기능을 제공하며 연주자가 다이나믹하고 상호작용적인 음악적 표현을 할 수 있도록 한다. 막형 전위차계과 압력 센서의 입력 데이터는 각각 피치와 음색의 변화를 제어하는 데 사용되며 Max/MSP와의 통합은 가능성과 확장성을 극대화한다. 아두이노 코드의 간결한 구조와 직관적인 데이터 처리 방식은 다양한 음악적 응용 프로그램에서 효율적인 사용을 가능하게 하며 물리적 인터페이스와 디지털 음악 제어를 효과적으로 연결한다.

3) 센서와 인간 감각의 상호작용

(1) 센서의 선형적 특성과 인간 감각의 비선형적 특성

막형 전위차계와 압력 센서는 선형적으로 데이터를 출력하지만 인간 감각은 이를 비선형적으로 인식한다. 이를 해결하기 위한 로그 변환 및 비선형 데이터 매핑 방법을 논의한다.

(2) 아두이노에서 선형 데이터를 로그 스케일로 변환하는 방법

아두이노에서 실시간 비선형 데이터를 시각적 피드백으로 매핑하는 구체적인 방법을 설명한다. 이를 통해 음악적 표현을 더욱 직관적으로 구현할 수 있다.

```

1 Arduino에서 Max/MSP로 데이터를 전송하며 선형값을 로그 스케일로 변환하는 코드
2
3 #include <math.h> 로그 변환을 위한 라이브러리
4
5 // 주요 변수
6 int linearValue = 512; 예시 선형 값 (0 ~ 1023 범위)
7 float logValue = 0; 로그 변환 값
8
9 void setup() {
10 | // 시리얼 통신 시작
11 | Serial.begin(9600); Max/MSP와의 연동을 위한 시리얼 통신 초기화
12 | }
13
14 void loop() {
15 | 선형 값을 로그 값으로 변환
16 | +1은 값이 0일 때 로그 계산 에러를 방지하기 위한 처리
17 | logValue = log(linearValue + 1);
18 |
19 | // Max MSP로 데이터 전송
20 | Serial.print("LogValue:");
21 | Serial.println(logValue); 로그 값 전송
22 |
23 | // 반복 속도 조절
24 | delay(10); // 데이터 전송 속도 조절
25 | }
26

```

[그림-15] 센서 데이터 로그 스케일 적용

[그림-15]는 막형 전위차계와 압력 센서의 선형적인 데이터를 출력하는 센서로 각각 터치 위치와 가해지는 압력에 따라 0에서 1023 사이의 값을 생성한다. 막형 전위차계는 사용자가 슬라이드한 위치를 기반으로 선형적인 아날로그 값을 출력하며 이는 물리적 길이에 따라 일정하게 증가한다. 예를 들어 슬라이드의 중간 위치에서는 출력 값이 약 512에 해당한다. 반면, 압력 센서는 가해지는 힘에 따라 선형적으로 값을 출력하며 압력이 증가할수록 출력 값도 비례하여 증가한다. 그러나 인간의 감각은 물리적 입력에 대해 선형적으로 반응하지 않는다. 소리의 높낮이는 주파수의 변화가 동일하더라도 높은 음역에서는 더 작은 차이로 느껴지고 압력에 대한 감각 역시 로그 스케일과 같은 비선형적 특성을 보인다.

따라서 이와 같은 불일치를 해결하기 위해 로그 변환을 사용하여 센서 데이터를 비선형적으로 매핑하는 방식이 필수적이다.

첨부된 아두이노 코드는 막형 전위차계와 압력 센서에서 입력된 선형 데이터를 로그 스케일로 변환하여 Max/MSP와 같은 오디오 프로세싱 소프트웨어에서 활용할 수 있도록 설계되었다. 코드는 입력 데이터를 처리하고 이를 로그 변환하여 인간의 감각에 더 적합한 비선형적 데이터로 매핑한 뒤 시리얼 통신을 통해 전달한다.

코드에서 사용된 `#include <math.h>`는 로그 계산을 위한 수학적 함수 라이브러리이다. `int linearValue = 512;`는 센서 데이터를 저장하는 변수로 초기값을 512로 설정한다. 이는 0에서 1023 범위의 선형 데이터를 가정하며 센서에서 지속적으로 입력받는다. `float logValue = 0;`는 로그 변환된 데이터를 저장하며 변환된 값을 실수형으로 처리하여 정밀도를 높인다. `setup` 함수는 시리얼 통신을 초기화하며 `Serial.begin(9600)`을 통해 9600bps의 통신 속도로 Max/MSP와 연결된다. 이를 통해 아두이노는 데이터를 실시간으로 전송할 수 있다.

`loop` 함수에서는 선형 데이터를 로그 변환하는 주요 로직이 수행된다. `logValue = log(linearValue + 1);`는 선형 데이터를 로그 스케일로 변환한다. 여기서 +1은 입력 값이 0일 때 로그 계산에서 발생할 수 있는 수학적 오류를 방지하기 위한 처리이다. 로그 변환은 입력 값의 작은 변화가 더 큰 감각적 차이를 출력하도록 하며 상단 범위에서는 점차적인 변화 감소를 구현한다.

이러한 특성은 인간의 비선형적 감각과 일치하여 사용자가 센서를 보다 직관적으로 제어할 수 있도록 한다.

변환된 데이터는 Serial.print와 Serial.println을 사용하여 Max/MSP로 전달된다. LogValue:는 데이터의 태그로 사용되며 Max/MSP에서 전송된 데이터를 구분하기 위한 목적으로 활용된다. 로그 변환된 데이터는 Max/MSP에서 피치, 필터 커팅 주파수, 볼륨 등 오디오 속성을 제어하는 데 사용된다. 데이터는 10ms 간격으로 업데이트되며 이는 delay(10)을 통해 구현된다. 이로써 실시간 데이터 처리가 원활하게 이루어지며 Max/MSP와의 연동에서 부드러운 데이터를 연산한다.

막형 전위차계의 선형 데이터는 위치 기반 제어를 위해 피치나 주파수 변조에 활용된다. 예를 들어 터치한 위치에 따라 출력값이 주파수로 매핑되어 음의 높낮이를 실시간으로 제어할 수 있다. 반면 압력 센서는 소리의 강약, 필터 커팅 주파수 또는 레조넌스를 제어하는 데 사용된다. 압력이 증가할수록 필터의 컷오프 주파수가 상승하거나 소리의 진폭이 커지는 방식으로 반응한다.

로그 변환은 센서의 선형 데이터를 인간 감각에 부합하는 비선형적 데이터로 변환하여 더 정밀하고 직관적인 제어를 가능하게 한다. 로그 변환을 통해 작은 입력 변화는 더 큰 음향적 변화를 유도하며 큰 입력 변화에서는 감각적 변화가 점차 완화된다. 이로써 센서의 물리적 특성과 감각적 피드백 간의 불일치를 해소할 수 있다.

이 아두이노 코드는 막형 전위차계와 압력 센서 데이터를 로그 스케일로 변환하여 Max/MSP에서 효과적으로 활용할 수 있는 신호로 연산한다. 막형 전위차계는 위치 데이터를 기반으로 피치나 주파수를 제어하며 압력 센서는 필터의 커팅 주파수나 소리의 강약을 제어한다. 이러한 데이터 변환은 사용자의 경험을 극대화하며 음악적 표현에서 더 높은 수준의 정밀한 제어를 가능하게 한다.

4) 예술적 및 실용적 적용

인간 감각의 비선형적 특성을 기술적으로 보정하는 것이 단순한 기술적 해결책을 넘어 음악적 표현의 세밀함을 강화하는 역할을 한다고 논할 수 있다. 즉 연주자가 민감하게 인지하는 작은 터치와 압력 변화가 실시간 음악 표현에 더 직접적이고 자연스러운 방식으로 반영되며 이는 감각적인 피드백을 통해 연주자의 창작 가능성을 확장 시킨다. 또한 이러한 비선형적 매핑을 통해 아티스트는 더 섬세하고 감각적인 사운드 디자인을 구현할 수 있게 되며 이는 인터랙티브 아트와 음악의 창작 과정에서 중요한 역할을 할 수 있다. 인간 감각의 비선형적 특성과 센서의 선형적 특성 간의 차이를 기술적으로 다루며 이를 음악적 인터페이스에서 어떻게 활용할 수 있는지 설명함으로써 과학적, 예술적 논의를 제시할 수 있다.

5) 터치디자이너로 시각적 표현 제어

이 작품은 터치디자이너를 활용하여 무용수의 움직임과 음악 데이터를 기반으로 시각적 요소를 생성하고 이를 실시간으로 표현하는 몰입형 멀티미디어 아트이다. 무용수의 움직임은 optical flow 분석을 통해 추적되며 음악 데이터는 오디오 스펙트럼 분석을 통해 시각적 요소에 영향을 미친다. 작품의 핵심은 움직임과 음악 간의 상호작용을 바탕으로 점과 선, 잔상 같은 시각적 효과를 생성하는 데 있다. 사용된 샘플 영상은 YouTube에 업로드된 <The dying swan - Natalia osipova (The royal ballet)>의 일부이다. 이 영상은 무용수의 섬세한 움직임과 역동성을 담고 있어 optical flow 기반의 시각적 표현에 적합하다.



[그림-16] The dying swan - Natalia osipova (The royal ballet)⁵⁴⁾

54) "The dying swan - Natalia osipova" is from the Royal Ballet and Opera YouTube channel (https://youtu.be/kJ4uowripdw?si=_jDsCMNwHC_XSn9C)

[그림-17]은 영상 데이터가 moviefilein1 노드를 통해 입력되며 optical flow 노드를 사용해 무용수의 움직임을 픽셀 단위로 분석한다. optical flow는 입력된 영상에서 픽셀 이동의 방향과 크기를 계산하여 벡터 필드를 생성하며 이 데이터는 움직임을 시각적으로 표현하는 선과 잔상의 기초가 된다. transform2와 fit2 노드는 optical flow 데이터를 화면 비율에 맞게 조정하여 무용수의 움직임이 정확히 스크린에 매핑되도록 한다. trail1 노드는 optical flow 데이터를 기반으로 무용수의 움직임을 따라 잔상을 생성하며 시간이 지남에 따라 잔상이 점점 희미해지는 효과를 부여한다. 이는 움직임의 역동성을 강조하며 무용수의 궤적을 시각적으로 강화하는 역할을 한다.

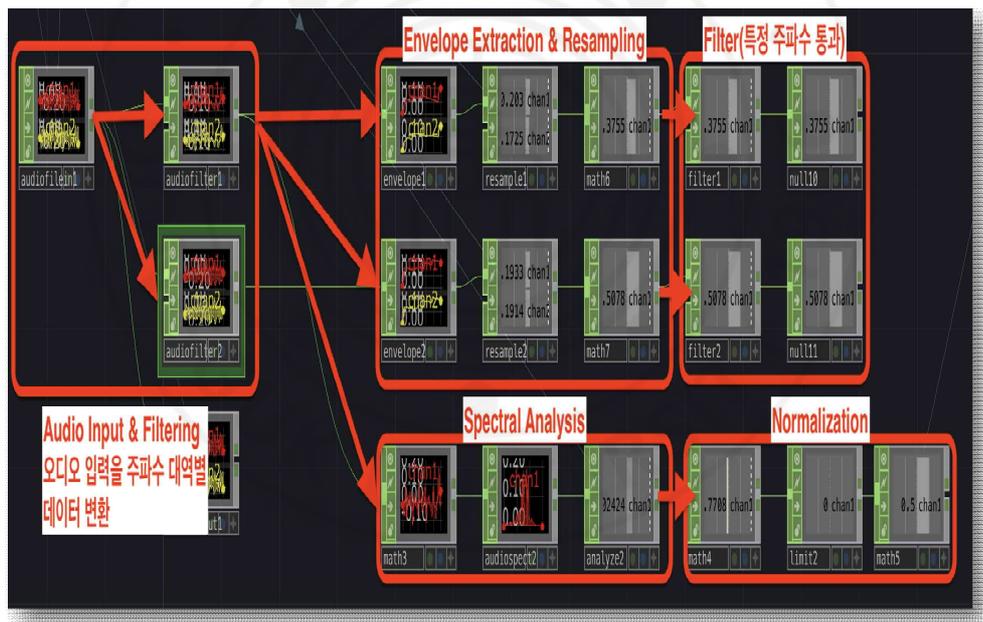


[그림-17] optical flow 데이터 환경

[그림-18]은 음악 데이터가 audiofilein1 노드를 통해 입력되며 audio filter1과 audiofilter2 노드는 오디오 신호를 주파수 대역별로 분리한다. 저주파 대역은 음악의 크기 데이터로 활용되며 고주파 대역은 점의 밀도와 잔상의 움직임에 영향을 미친다. audiospectalyzel과 audiospectalyze2 노드는 음악 신호를 스펙트럼 분석하여 주파수별 에너지 데이터를 추출한다. 이 데이터는 math와 filter 노드를 통해 스케일링 및 부드럽게 처리되며 점과 선의 크기, 밝기, 위치 등을 제어하는 데 사용된다.

optical flow 데이터와 음악 데이터는 다양한 math 노드와 logic 노드를 통해 결합된다. math 노드 그룹은 입력 데이터를 정규화하고 스케일링하여 점과 잔상 효과를 조작할 수 있는 값으로 변환한다.

[그림-19-2]와 같이 logic1 노드는 음악 신호의 특정 임계값을 설정하여 조건부로 점 생성 및 애니메이션 활성화 여부를 결정한다. animation 1 노드는 optical flow 데이터와 음악 신호를 결합하여 점과 선의 움직임을 더욱 동적으로 변환하며 이는 음악과 움직임의 상호작용을 강화한다.



[그림-18] 오디오 분석을 시각적 데이터 변환

[그림-19-1]과 같이 잔상 생성은 trail1 노드를 통해 이루어진다. 이 노드는 optical flow 데이터를 기반으로 잔상을 생성하며 잔상의 길이와 밀도는 움직임의 방향과 속도에 따라 변화한다. filter 노드와 math6, math7 노드는 점의 크기와 밝기를 조정하며 음악 신호의 에너지 레벨에 따라 점의 밀도와 움직임이 실시간으로 변한다. 이러한 과정은 음악과 시각적 요소 간의 동적 연결을 표현하며 시청자에게 강렬한 몰입감을 제공한다.



[그림-19.1] animation 노드 (1)



[그림-19.2] animation 노드 (2)

최종적으로 생성된 시각적 요소는 window1 노드를 통해 실시간으로 화면에 출력되며 level1 노드는 출력 신호의 밝기와 대비를 조정하여 시각적 완성도를 높인다. moviefileout1 노드는 시각적 결과물을 영상 파일로 저장하며 이를 통해 작품을 기록하거나 재사용할 수 있다.

이 작품은 터치디자이너의 optical flow 기술과 오디오 스펙트럼 분석을 결합하여 음악과 무용수의 움직임을 유기적으로 연결하고 이를 실시간으로 시각화 하였다. 사용된 샘플 영상인 <The dying swan - Natalia osipova (The royal ballet)>은 무용수의 정교한 움직임과 터치디자이너 기반 시각적 요소의 상호작용을 완벽히 보여준다. 노드 간의 신호 흐름은 체계적이고 유기적으로 설계되었으며 각각의 노드는 시각적 또는 음향적 효과를 구현하는데 특정한 역할을 수행한다. 이를 통해 음악, 움직임, 시각적 요소가 결합된 몰입형 멀티미디어 아트를 구현하며 실시간 상호작용성과 창의성을 극대화하였다.

IV. 사운드 디자인 연구

본 논문에서 다루고 있는 멀티미디어 작품 <Splinters of Light: 빛의 파편>은 사운드 디자인을 통해 무용수의 움직임과 음악적 요소를 실시간으로 상호 작용하도록 설계되어 2024년 11월 9일 동국대학교 이해랑 예술극장에서 진행된 ‘SEEING SOUND, LISTENING IMAGE(보는 소리, 듣는 영상) 2024’에서 초연되었다. 작품의 핵심은 무용수의 춤사위와 연주자가 제작한 사운드가 상호 반응하며 관객에게 몰입감을 제공하는 것이다. 사운드 디자인은 무용수의 움직임을 잔상으로 표현하는 시각적 요소와 밀접하게 연결되어 있으며 이를 통해 음악과 움직임의 유기적인 융합을 탐구한다.

1. 테이프음악을 위한 사운드 디자인

본 연구에서 다루고 있는 테이프음악(tape-music)은 20세기 중반 전자음악의 선구적 형태로 물리적 테이프를 이용해 소리를 변형하고 배치하여 새로운 음악적 가능성을 탐구한 장르이다. 디지털 기술의 발전과 함께 테이프음악은 물리적 한계를 넘어 새로운 방식으로 재구성되었으며 Max/MSP는 이러한 현대적 테이프음악 구현에 있어 중요한 도구로 자리 잡고 있다.

본 연구에서는 Max/MSP를 활용하여 다양한 사운드 합성 기법으로 소리를 설계하고 이를 시간적 구조와 결합해 하나의 곡으로 완성하는 과정을 탐구한다. 테이프음악은 단순한 사운드의 나열이 아닌 사운드의 질감, 움직임, 변화를 통해 이야기를 전달하는 것이 핵심이다.

이를 구현하기 위해 FM합성(FM synthesis)와 웨이브테이블합성(wavetable synthesis)등 다양한 기법을 활용하여 음색을 조작하고 공간적 깊이와 시간적 흐름을 설계하였다. 이러한 기법은 사운드의 내적 구조를 탐구하며 각 사운드가 곡 내에서 상호작용하도록 구성되었다. 본 작품은 기승전결의 서사적 구조를 통해 청자를 사운드의 흐름 속으로 초대하고 각각의 음향 요소를 통해 감각적 경험을 극대화한다. 서두에서는 긴장감과 기대를 조성하며 점진적으로 밀도와 복잡성을 높여 극적인 절정을 이루고 이후에는 잔잔한 여운을 남기는 마무리로 곡을 완성한다. 이러한 구조적 접근은 테이프음악의 전통적 방법론을 현대적 기술로 재해석한 시도이며 디지털 환경에서 새로운 사운드 디자인의 가능성을 제시한다.

1) FM합성

FM합성은 하나의 주파수(캐리어 주파수, f_c) 를 다른 주파수(모듈레이터 주파수, f_m)로 변조하여 새로운 음색을 생성하는 음향 합성 기법이다. 이 방법은 1960년대 <존 차우닝>(John Chowning, 1934~)⁵⁵⁾에 의해 디지털 음악 합성의 주요 기법으로 발전하였다. FM은 간단한 구조를 사용하면서도 매우 복잡하고 풍부한 음색을 생성할 수 있는 능력으로 인해 전자음악과 디지털 음악 제작에서 널리 사용된다.

55) FM합성(frequency modulation synthesis)을 개발한 미국의 작곡가이자 컴퓨터 음악 선구자

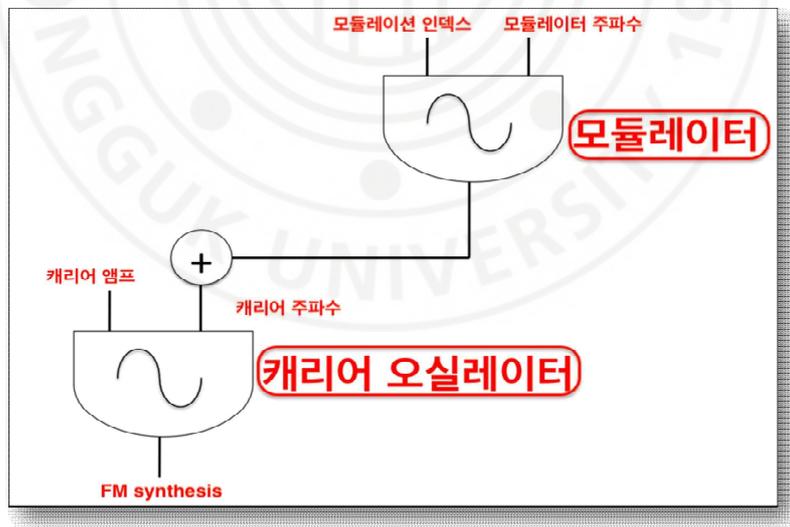
(1) FM합성의 기본 수학적 원리

$$y(t) = A \sin(2\pi f_c t + I \sin(2\pi f_m t))$$

- 가. A : 출력 신호의 진폭
- 나. f_c : 캐리어(carrier)⁵⁶⁾ 주파수
- 다. f_m : 모듈레이터(modulator)⁵⁷⁾ 주파수
- 라. I : 모듈레이션 인덱스⁵⁸⁾, 음색 복잡성을 조절

모듈레이션 인덱스 I 는 음색의 복잡성에 큰 영향을 미친다. I 가 클수록 더 많은 고조파가 생성되어 복잡한 음색이 형성되며 I 가 작을수록 단순한 음색이 생성된다.

[그림-19]은 FM합성의 도식이다.

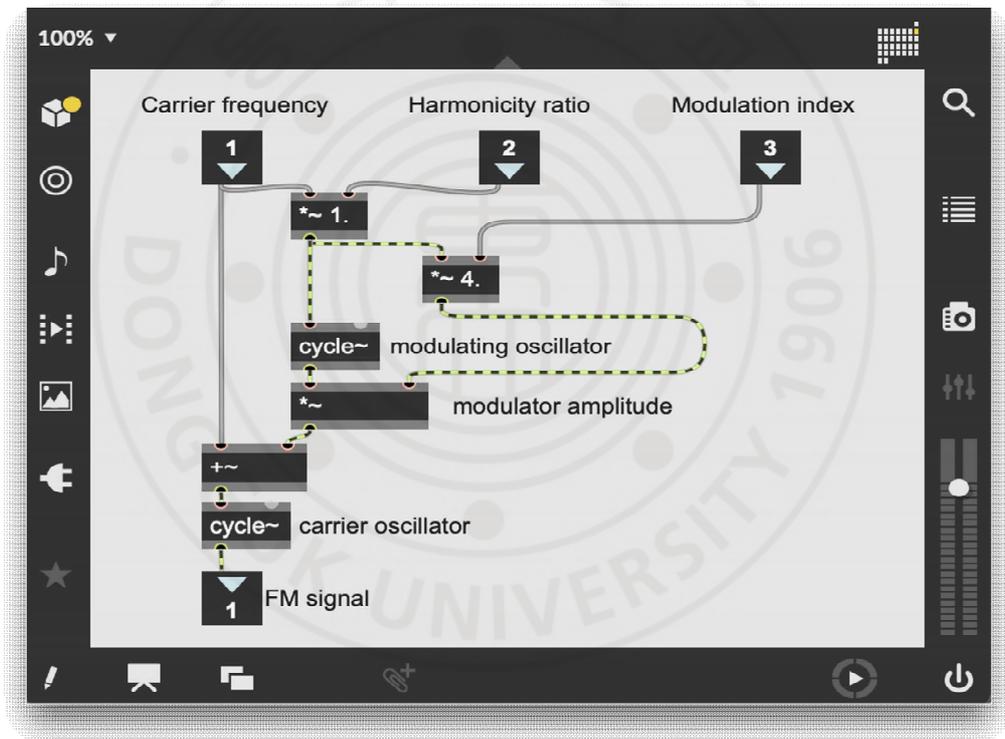


[그림-20] FM합성 도식

56) 합성 음향에서 기본 주파수를 담당하는 신호
 57) 캐리어(carrier) 신호를 변조하여 주파수, 진폭, 또는 위상과 같은 요소를 변화시키는 신호
 58) 모듈레이터(modulator)가 캐리어(carrier) 신호에 영향을 미치는 정도를 나타내는 값

(2) FM합성 방법

[그림-21]은 Max/MSP에서 FM의 기본 구조를 나타내며 실시간 조작 가능한 인터페이스를 통해 FM을 제어하는 패치를 구현하였다. 이러한 패치는 FM의 주요 제어 값(주파수, 하모닉59) 비율, 변조 지수)을 통해 다양한 음향 결과를 생성할 수 있는 실험적 도구로 활용하였다.

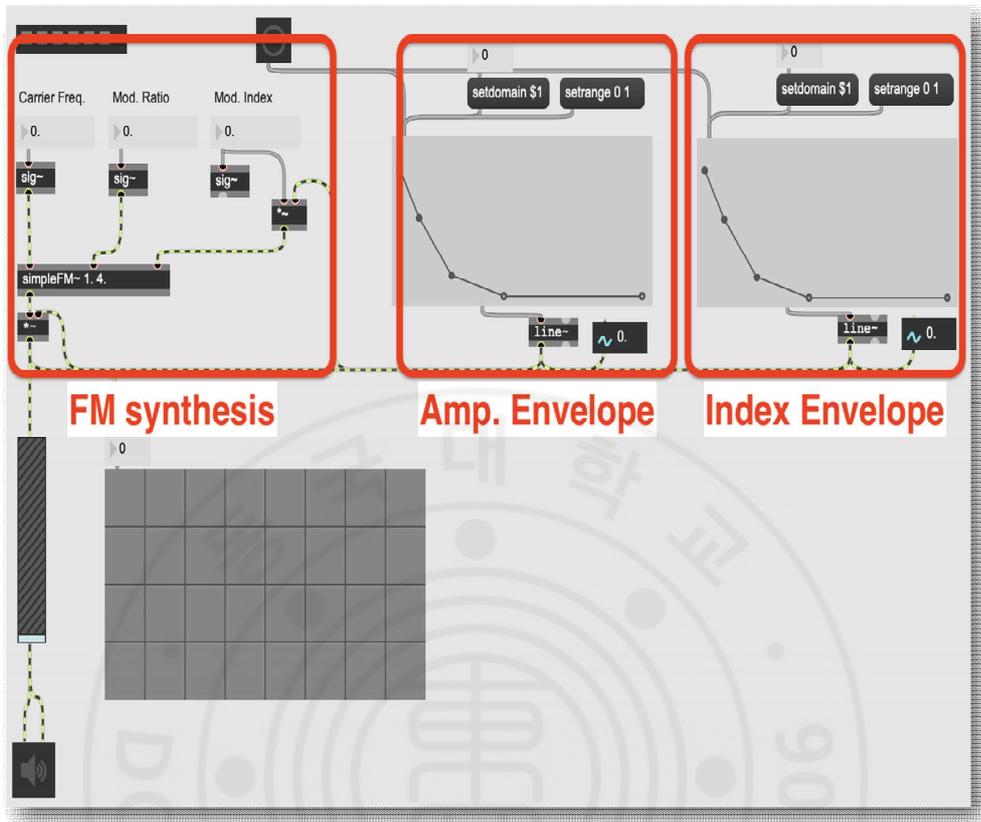


[그림-21] FM합성 오실레이터 패치

59) 기본 주파수(기본음, Fundamental Frequency)의 정수배로 발생하는 주파수 성분

[그림-21]은 FM의 기본 구조를 구현한 패치로 patcher 오브젝트를 사용하여 구조를 구성하였다. patcher는 독립적인 서브패치로 구현되어 FM의 구조를 캡슐화하였다. 이로 인해 패치를 더 간결하고 체계적으로 구성할 수 있다. 캐리어 주파수는 inlet오브젝트를 통해 제어되며 patcher 내부에서 cycle~오브젝트로 전달된다. 이 cycle~는 캐리어 오실레이터로 작동하며 기본적인 사인과 신호를 생성한다.

변조자 오실레이터는 또 다른 cycle~오브젝트를 사용하여 생성되며 주파수는 harmonicity ratio 슬라이더와 *~오브젝트를 통해 캐리어 주파수에 비례하도록 설정된다. 변조자의 진폭은 modulation index 슬라이더로 제어되며 이는 *~를 통해 변조 신호의 강도를 조정하는 데 사용된다. 변조자 신호는 +~오브젝트를 통해 캐리어 신호의 주파수에 더해져 변조된 주파수를 만든다. 최종적으로 변조된 신호는 캐리어 cycle~의 입력으로 전달되어 FM 신호를 생성하며 생성된 신호는 outlet오브젝트로 출력된다. patcher를 활용하여 FM의 구조를 모듈화하고 간결하고 명확한 신호 흐름을 유지하도록 설계된 것이다.



[그림-22] FM합성 패치

[그림-22]의 패치는 더 직관적인 인터페이스와 다양한 컨트롤 옵션을 수행하기 위해 구현하였다. sig~오브젝트는 실시간으로 캐리어 주파수(carrier frequency), 변조 비율(modulation ratio)⁶⁰⁾, 변조 지수(modulation index)의 값을 입력받아 FM을 제어하는 역할을 한다.

simpleFM~오브젝트는 FM의 핵심 처리를 담당하며 입력된 캐리어 주파수와 변조 비율 및 변조 지수를 바탕으로 변조된 신호를 생성한다.

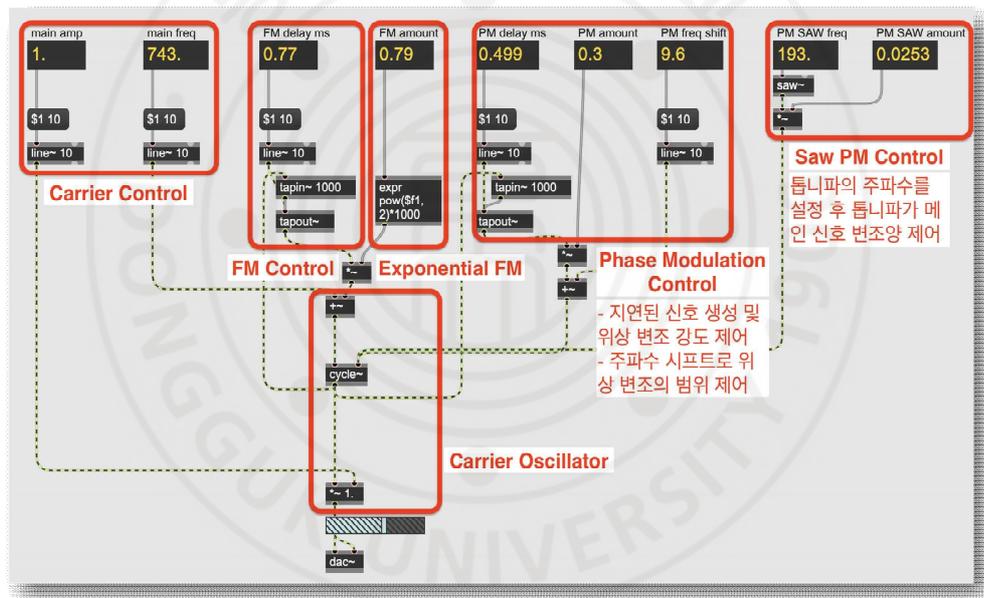
60) 모듈레이터 주파수와 캐리어 주파수의 비율

변조 신호는 *~ 오브젝트를 거쳐 최종적으로 진폭이 조정되며 출력 전의 신호 크기를 조절한다. 직접 그래픽 인터페이스를 통해 캐리어와 변조의 파형 변화를 조작할 수 있으며 이 과정에서 진폭 변화를 line~오브젝트로 매끄럽게 적용한다. 최종 FM 신호는 dac~로 출력되며 이를 통해 FM합성 결과를 청취할 수 있다.



2) PM&FM synthesis

[그림-23]의 Max/MSP 패치는 주파수 변조(FM, frequency modulation)와 위상 변조(PM, phase modulation)⁶¹⁾를 조합하여 복잡한 음향 신호를 생성하는 구조로 설계되었다. 패치의 핵심은 기본 사인파 신호(cycle~)를 기반으로 FM과 PM 변조를 통해 음색을 조작하며 각 제어 값과 오브젝트가 이를 세밀히 제어한다는 점이다.



[그림-23] FM&PM합성 패치

PM은 기본 신호의 위상을 변조 신호로 조작하는 방식으로 작동한다. 변조 신호는 tapin~과 tapout~을 통해 딜레이가 적용되며 PM delay ms로 지연 시간이 설정된다.

61) 캐리어 신호의 위상을 모듈레이터 신호에 따라 변경하여 새로운 음색이나 주파수를 생성하는 방법

PM amount 제어 값을 통해 위상 변조의 강도를 제어하며 변조된 신호는 +~ 오브젝트를 통해 기본 신호의 위상에 추가된다. 추가적으로 PM freq shift는 변조 신호에 주파수 오프셋을 적용하여 더욱 복잡한 음색 변화를 가능하게 한다.

PM 변조에 톱니파(saw~) 신호를 추가하여 음향의 복잡성을 더욱 증가시킨다. PM SAW freq는 톱니파의 주파수를 설정하며 PM SAW amount는 톱니파 신호가 위상 변조에 미치는 영향을 제어한다. 톱니파의 고조파 특성은 위상 변조의 음향적 다양성을 극대화하며 이는 최종 음색에 풍부함을 더한다.

FM은 기본 주파수(main freq)를 변조 신호에 따라 시간적으로 변동시켜 음색의 다양성을 만들어낸다.

변조 강도는 FM amount 설정 값으로 제어되며 이는 $\text{expr pow}(\$f1, 2) * 1000$ 의 비선형 수식을 통해 처리되어 세밀한 조정을 가능하게 한다. 변조 신호는 tapin~과 tapout~오브젝트를 통해 딜레이가 적용되며 지연 시간은 FM delay ms를 통해 조정된다. 이 FM 변조 신호는 기본 사인파 주파수에 직접 더해져 주파수 변조를 구현한다.

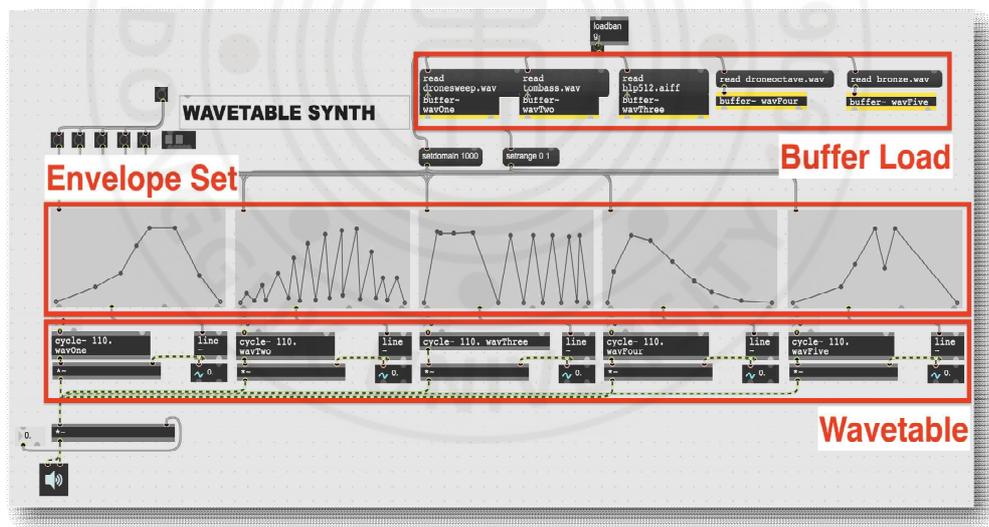
FM과 PM 변조 신호는 +~와 *~오브젝트를 통해 결합되며 최종적으로 cycle~에서 생성된 기본 신호에 적용된다. 이 변조된 신호는 main amp 제어 값을 통해 최종 출력 진폭이 조정되며 dac~로 전달되어 소리가 출력된다.

결론적으로 이 패치는 FM과 PM의 원리를 통합하여 시간적, 주파수적, 위상적 특성을 실시간으로 조작할 수 있는 유연한 사운드 합성 환경을 구현한다. 딜레이를 활용한 변조와 톱니파의 추가는 복잡하고 유기적인 음색 변조를 가능하게 하며 다양한 조작을 통해 음향적 효과를 용이하게 한다.



3) wavetable synthesis

[그림-24]는 웨이브테이블합성을 구현한 시스템으로 다섯 개의 오디오 버퍼와 고유의 엔벨로프(envelope)⁶²⁾를 결합하여 복잡적이고 유기적인 음향을 생성하도록 설계되었다. 웨이브테이블은 1970년대 PPG Wave⁶³⁾와 같은 초기 디지털 신디사이저에서 시작된 기술로 파형 데이터를 디지털 방식으로 저장하고 반복 재생함으로써 다양한 음색을 만들어내는 방식이다. 이 패치는 그러한 웨이브테이블의 기본 원리를 Max/MSP 환경에서 구현한 사례로 다양한 샘플 데이터를 동적으로 변형하여 실시간 음향 합성을 가능하게 한다.



[그림-24] 웨이브테이블합성 패치

62) 음향의 시간적 변화를 제어하는 도구로 소리의 시작부터 끝까지의 진폭 변화를 정의하는 곡선

63) 초기 웨이브테이블 신디사이저로 디지털 웨이브테이블 합성과 아날로그 필터를 결합하여 독특한 음색을 연출하는 디지털 신디사이저

패치의 핵심은 다섯 개의 buffer~오브젝트를 활용하여 서로 다른 웨이브테이블 데이터를 저장하고 이를 반복적으로 재생하며 각 신호에 고유한 엔벨로프를 적용하여 시간적 특성을 추가하는 것이다.

초기화는 loadbang오브젝트를 통해 이루어지며 dronesweep, tombass, blp512, droneoctave, bronze와 같은 오디오 파일이 각각의 버퍼에 로드된다. 각 버퍼는 저장된 데이터를 cycle~로 전달하며 cycle~은 주파수 입력 값(110 헤르츠(Hz)⁶⁴)을 기준으로 데이터를 일정한 주기로 반복 재생한다. 이 과정을 통해 웨이브테이블합성의 기본 신호가 생성된다.

신호의 시간적 변화를 구현하기 위해 function오브젝트가 사용되며 이는 각 버퍼에 대응되는 고유한 엔벨로프를 정의한다. function의 그래픽 인터페이스를 통해 엔벨로프 형태를 직접 조정할 수 있으며 이렇게 정의된 엔벨로프는 line~오브젝트를 통해 부드럽게 적용된다. 엔벨로프는 시간에 따라 진폭 변화를 제어하며 이는 신호에 다이내믹스와 유기성을 부여한다. 다섯 개의 독립적인 신호는 각각의 버퍼와 엔벨로프를 기반으로 처리된 후 결합되어 최종 출력 신호를 생성한다.

최종 출력 신호는 amplitude 제어 값을 통해 전체 볼륨을 제어하며 이를 통해 신호의 크기와 음량 균형을 실시간으로 조정할 수 있다. 이러한 출력 구조는 다섯 개의 웨이브테이블이 각기 독립적인 특성을 유지하면서도 전체적으로 조화로운 음향을 만들어내도록 한다.

64) 주파수의 단위로 1초 동안 발생하는 진동 수

웨이브테이블은 저장된 파형 데이터를 활용하면서도 그 데이터를 시간적으로 변형하거나 여러 웨이브테이블 사이를 이동함으로써 복잡하고 풍부한 음향적 결과를 만들어낼 수 있다.

이 패치는 합성 원리를 충실히 반영하면서도 function 을 통한 엔벨로프 제어와 buffer~를 통한 데이터 저장을 결합하여 웨이브테이블의 응용 가능성을 확장하고 있다. 또한 샘플 데이터를 활용한 창의적이고 유기적인 음향 설계를 가능하게 한다. 패치를 통해 복잡한 음향 합성을 직관적이고 유연하게 제어할 수 있으며 웨이브테이블합성을 기반으로 다양한 사운드 디자인 실험을 수행할 수 있다.

4) rhythm sequencer

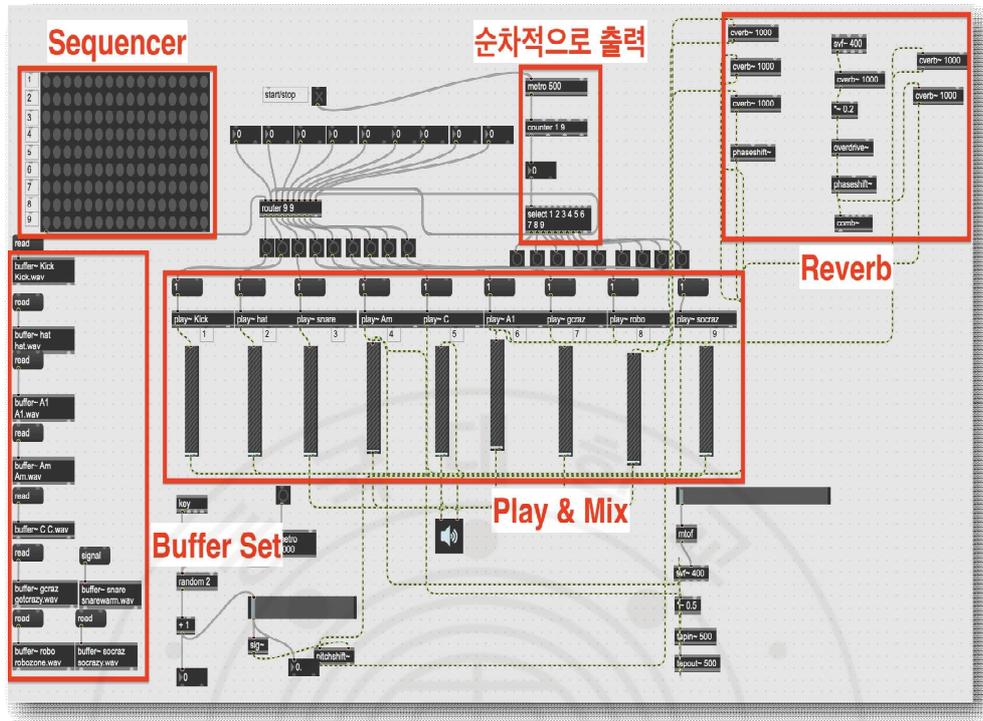
[그림-25]는 샘플(audio sample)⁶⁵⁾ 기반의 시퀀싱(sequencing)⁶⁶⁾ 시스템으로 구현된 것으로 9개의 독립적인 샘플 트랙과 오디오 효과 처리 체인을 포함하고 있다. 시퀀서는 matrixctrl 오브젝트를 사용하여 시퀀싱 매트릭스를 구성하였으며 각 버튼은 특정 트랙과 시간 단계의 트리거(trigger)를 정의한다.

사용자가 매트릭스(matrix)의 버튼을 활성화하면 router 오브젝트를 통해 트리거 신호가 전달되고 특정 트랙이 재생된다. 시퀀싱의 템포는 metro 500 오브젝트를 사용하여 설정되며 counter 오브젝트와 select 오브젝트를 통해 매트릭스의 각 열이 순차적으로 활성화된다. 이 과정에서 특정 열의 활성화가 buffer~와 play~로 트리거 신호를 전달하여 샘플 데이터를 재생하도록 한다.

각 샘플은 buffer~에 로드되어 있으며 초기화 시 read 메시지를 통해 오디오 파일이 자동으로 로드된다. 트랙의 샘플 재생은 play~를 통해 이루어지며 이 신호는 sig~와 볼륨 슬라이더를 통해 진폭이 조정된다. 모든 트랙의 신호는 독립적으로 오디오 효과 체인을 거치며 효과 체인에는 cverb~ 오브젝트를 통한 리버브 효과 svf~ 오브젝트를 통한 주파수 필터링 overdrive~ 오브젝트를 통한 신호 왜곡 comb~ 오브젝트를 통한 잔향 생성 등이 포함되어 있다. phasor~는 위상 변조를 추가하여 시간적 변화와 독특한 음향 효과를 출력한다.

65) 디지털 오디오에서 소리를 표현하기 위해 시간축에서 정기적으로 측정된 신호 값

66) 음표, 리듬, 음색 등의 연주 정보를 시간 순서에 따라 배열하는 과정



[그림-25] rhythm sequencer 패치

효과 처리가 완료된 각 트랙의 신호는 믹싱 단계로 전달되며 최종적으로 단일 출력 신호로 통합된다. 출력 신호는 tapin~과 tapout~를 사용하여 약간의 딜레이를 추가하고 최종적으로 스피커로 출력된다.

이 패치는 random 오브젝트를 사용하여 특정 샘플 트리거를 랜덤화할 수 있는 기능을 포함하고 있어 패턴 생성의 예측 불가능성을 더하며 창의적인 사운드 디자인에 기여한다. 사용자는 matrixctrl을 통해 트리거 패턴을 직관적으로 설정할 수 있으며 buffer~와 play~를 통해 다양한 샘플을 로드하고 실시간으로 재생할 수 있다.

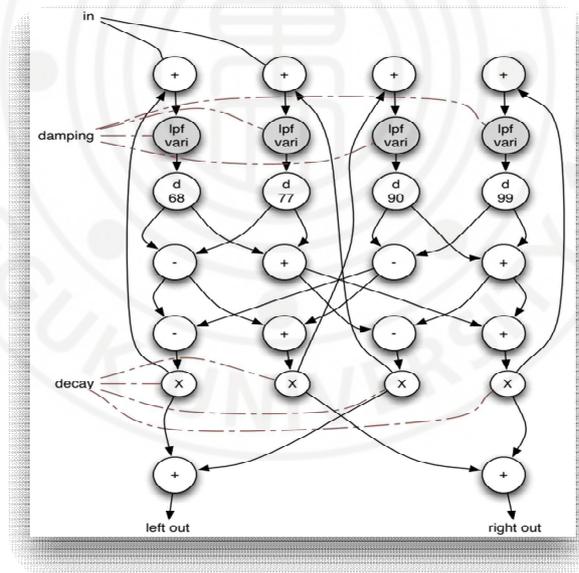
시퀀싱과 오디오 처리가 결합된 이 시스템은 전통적인 드럼 머신의 기능을 확장하며 다층적이고 복합적인 음향을 생성할 수 있다. 이 패치는 독립적으로 각 트랙의 샘플과 효과를 조작할 수 있는 구조를 매개로 실시간 사운드 디자인과 음악 제작에 강력한 도구로 활용될 수 있다.



5) FDN(feedback delay network) digital reverb

본 작품에서 사용된 리버브는 Miller Puckette⁶⁷⁾이 제안한 디지털 방식이다. 이 설계의 핵심 특징은 N개의 딜레이 라인으로 구성되며 딜레이 라인들이 NxN 단위 이득 행렬(unitary gain matrix)⁶⁸⁾에 입력된 후 다시 딜레이 라인으로 피드백되는 구조이다. 이 경우 모든 이득 계수(gain multiplier)⁶⁹⁾가 1로 설정되어 있으며 해당 행렬은 하다마드 행렬(Hadamard matrix)⁷⁰⁾로 나타난다.

아래 그림은 FDN의 4X4 digital reverb의 도식이다.



[그림-26] feedback delay network⁷¹⁾

67) Max와 Pure Data(Pd) 인터랙티브 멀티미디어 소프트웨어의 창시자

68) 에너지가 변하지 않는 시스템을 구현하기 위해 사용되는 행렬

69) 입력 신호에 곱해져 출력 신호의 크기를 제어

70) 다중 신호의 에너지 균등 분배 및 변조, 리버브의 피드백 네트워크 설계

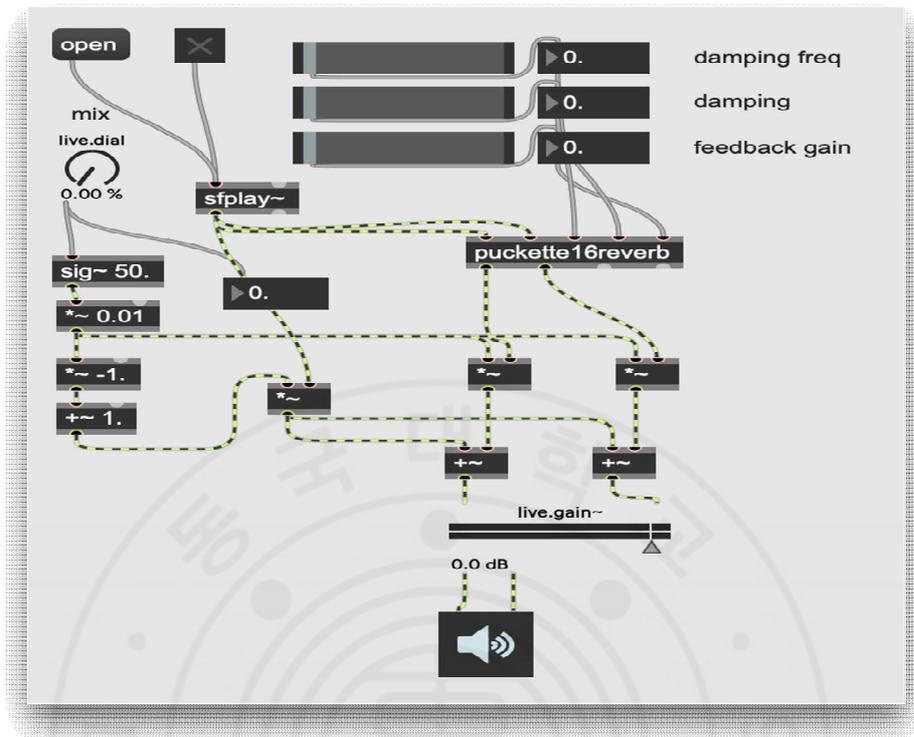
Miller Puckette의 디지털 리버브는 디지털 신호 처리에서 물리적 공간의 소리 반사를 모사하여 인공적인 잔향 효과를 생성하는 알고리즘으로 설계되었다. 이 알고리즘은 다중 딜레이 라인⁷²⁾, 피드백 네트워크, 주파수 필터링을 통해 음향적으로 자연스러운 잔향을 효율적으로 생성하며 첨부된 Max/MSP 패치는 이러한 리버브 알고리즘을 구현한 구체적인 사례이다. 디지털 리버브는 먼저 짧은 딜레이를 통해 초기 반사를 생성한 후 피드백과 필터링으로 잔향을 확장하며 음향의 밀도를 높이는 방식으로 작동한다. 푸켓의 설계는 이러한 과정을 효율적으로 처리하며 자연스러운 공간감을 연출하는 데 중점을 두었다.

[그림-27]의 메인 패치에서는 `sfplay~`를 사용해 외부 오디오 파일을 재생하며 이 신호를 `puckette16reverb` 서브패치로 전달한다. `damping frequency`, `damping`⁷³⁾, `feedback gain` 등의 제어 값을 조작하여 리버브의 지속 시간과 음색을 제어할 수 있다. `mix`를 조정하는 `live.dial` 오브젝트는 원음과 리버브 신호 간의 비율을 결정하며 0%는 원음만 100%는 리버브 신호만 출력한다. `sfplay~`에서 출력된 신호는 `sig~`를 통해 제어 값과 상호작용하며 `damping freq`, `damping`, `feedback gain` 값이 실시간으로 신호 처리에 반영된다. 리버브 처리된 신호는 `live.gain~` 오브젝트를 통해 볼륨이 조정되며 최종적으로 출력된다.

71) Reverb Topologies and Design-Tom Erbe(UC San Diego)

72) 여러 개의 독립적인 딜레이 경로를 설정하여 신호를 처리하는 방식

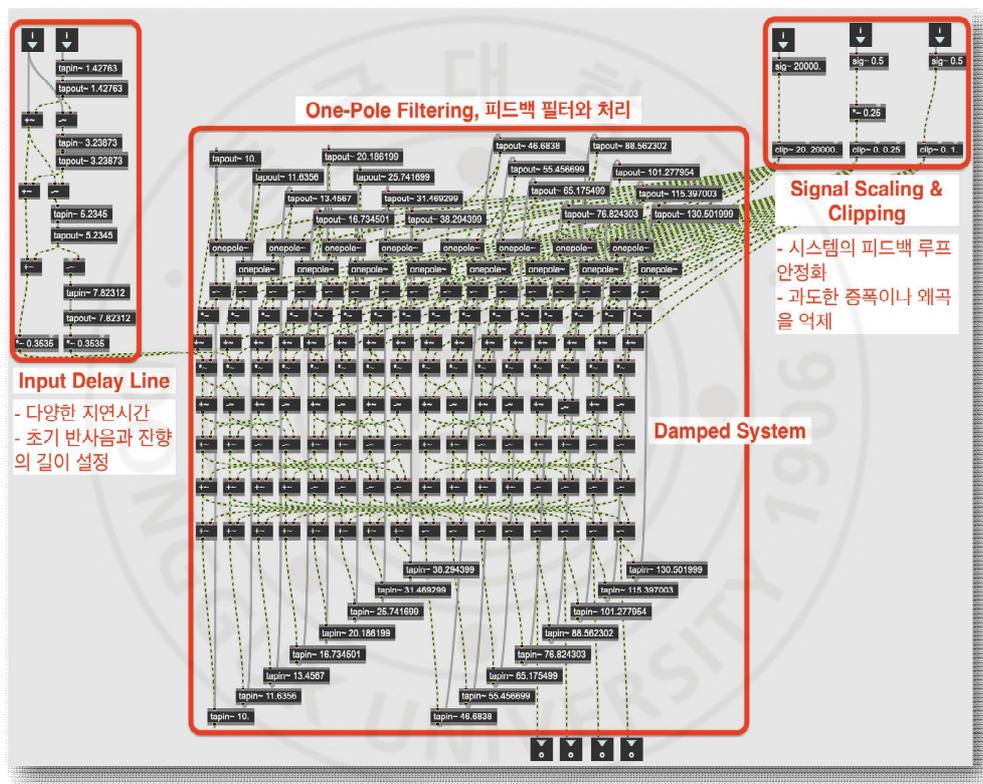
73) 고주파를 감쇠하거나 잔향 시간이 점차 감소하도록 제어하는 과정



[그림-27] feedback delay network reverb 패치

[그림-28]의 `puckette16reverb` 서브패치는 리버브의 핵심 처리 부분으로 다중 딜레이 라인, 피드백 네트워크 그리고 필터링 모듈로 구성되어 있다. `tapin~`과 `tapout~`는 딜레이 라인을 형성하며 `tapin~`은 입력 신호를 저장하고 `tapout~`은 설정된 지연 시간 후 신호를 출력한다. 이러한 딜레이 라인은 초기 반사와 잔향 꼬리를 형성하며 각각의 `tapout~`은 서로 다른 딜레이 시간을 가지도록 설정되어 다양한 공간적 특성을 모사한다. 피드백 네트워크는 `tapout~`의 출력이 다시 `tapin~`으로 순환되도록 하여 잔향의 지속 시간을 연장하며 피드백 강도는 `feedback gain` 제어 값을 통해 제어된다. `onepole~` 오브젝트는 잔향 신호에서 특정 주파수를 감쇠하거나 강조하는 역할을 하

며 저역 통과 필터로 작동해 신호를 부드럽게 조정한다. damping freq 제어 값은 필터의 컷오프 주파수를 설정해 고주파 감쇠를 조정하며 잔향의 음색을 결정한다. clip~ 오브젝트는 피드백 경로에서 신호가 과도하게 증폭되는 것을 방지하며 안정성을 유지한다.

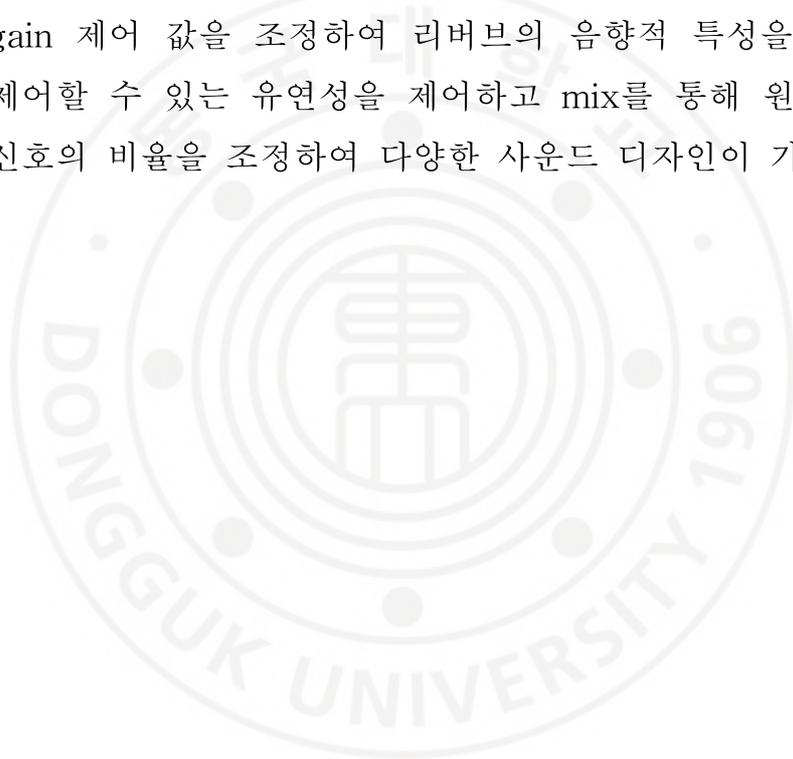


[그림-28] feedback delay network reverb 서브 패치

신호는 sfplay~에서 시작해 puckette16reverb로 전달되어 초기 반사가 생성된 후 피드백과 필터링을 통해 잔향으로 확장된다. 병렬로 구성된 다중 딜레이 라인은 각기 다른 시간 지연을 추가하여 복잡한 잔향을 형성하며 모든 신호는 결합된 후 메인 패치로 반환된다.

반환된 신호는 원음과 혼합되어 mix를 통해 비율이 조정된 후 live.gain~을 거쳐 최종적으로 출력된다.

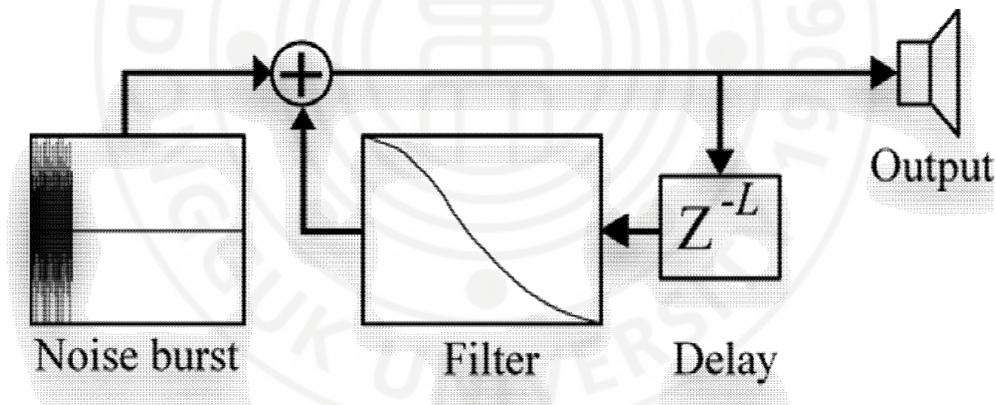
이 패치는 디지털 리버브의 원리를 효율적으로 구현한 것으로 tapin~과 tapout~을 통해 초기 반사를 생성하고 피드백 네트워크로 잔향을 확장하며 onepole~ 필터로 음색을 조정하고 clip~ 으로 안정성을 보장한다. damping freq, damping, feedback gain 제어 값을 조정하여 리버브의 음향적 특성을 실시간으로 제어할 수 있는 유연성을 제어하고 mix를 통해 원음과 리버브 신호의 비율을 조정하여 다양한 사운드 디자인이 가능하다.



6) Karplus-Strong string synthesis

Karplus-Strong 알고리즘은 디지털 신호 처리를 통해 기타와 같은 현악기의 소리를 물리적으로 모델링한 방식이다. 이 알고리즘은 짧은 딜레이 라인, 피드백 네트워크, 저역 통과 필터를 사용하여 현의 진동과 에너지 손실을 모사하며 초기 자극 신호를 사용해 음향을 생성하고 이를 순환적으로 처리하여 소리의 지속성과 감쇠를 표현한다.

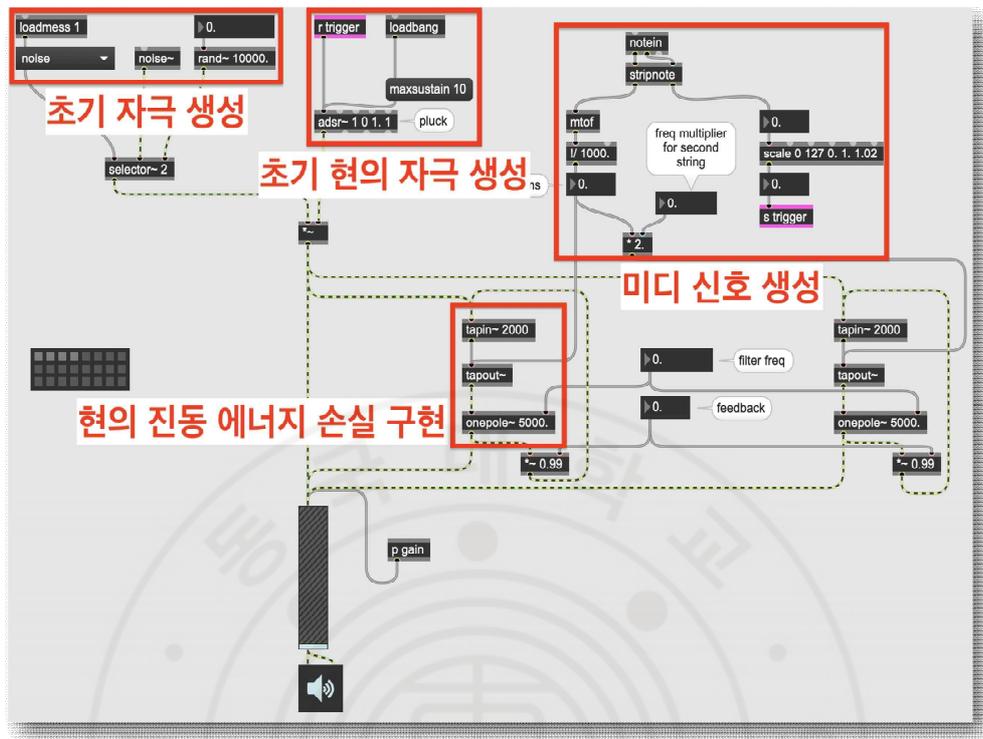
[그림-29]는 Karplus-Strong 알고리즘의 도식화 된 그림이다.



[그림-29] Karplus-Strong 알고리즘 도식⁷⁴⁾

[그림-30]은 Karplus-Strong 알고리즘을 구현한 예시로 noise~와 rand~오브젝트를 초기 자극 신호로 사용하여 플릭(pluck)된 현의 소리를 생성하며 다양한 오브젝트와 제어 값을 통해 신호를 세부적으로 조작할 수 있다.

74) https://en.wikipedia.org/wiki/Karplus%E2%80%93Strong_string_synthesis



[그림-30] Karplus-Strong string 합성 패치

이 패치의 초기 자극은 noise~ 또는 rand~ 오브젝트를 통해 생성되며 selector~ 오브젝트를 통해 두 신호 중 하나를 선택할 수 있다. noise~는 지속적인 백색 소음(white noise)⁷⁵⁾을 생성하며 rand~는 무작위 값을 생성해 보다 불규칙적인 자극을 출력한다.

신호는 *~를 거쳐 진폭이 조정되며 ADSR⁷⁶⁾ 엔벨로프를 설정하는 adsr~ 오브젝트로 전달된다. adsr~는 플러킹된 현의 소리가 시간에 따라 어떻게 변화하는지를 결정하며 초기 어택과 릴리스의 속도를 조정할 수 있다. 플러킹된 신호는 이후 딜레이 라인으로 전달되어 Karplus-Strong 알고리즘의 핵심 처리 단계로 진입한다.

75) 모든 가청 주파수(20Hz~20kHz) 대역에 걸쳐 균등한 에너지를 가진 무작위 신호

76) 소리의 시간적 변화를 정의, attack, decay, sustain, release

tapin~과 tapout~은 딜레이 라인을 형성하며 tapin~은 입력 신호를 저장하고 tapout~은 저장된 신호를 특정 시간 지연 후 출력한다. 딜레이 시간은 notein오브젝트를 통해 MIDI 입력 신호로부터 전달된 노트 값을 기반으로 계산되며 mtof오브젝트를 사용해 MIDI 값을 주파수로 변환한 후 1000으로 나누어 밀리초 단위로 변환된다. 이를 통해 딜레이 라인의 길이가 설정되며 이 길이는 생성된 소리의 기본 주파수를 결정한다. 첫 번째 딜레이 라인의 출력 신호는 onepole~를 통해 저역 필터링이 적용되어 소리의 고주파 성분이 감소되며 실제 현의 진동에서 에너지가 손실되는 현상을 모사한다.

피드백 네트워크는 딜레이 라인의 출력 신호를 다시 입력으로 순환시켜 소리의 지속 시간과 잔향을 생성한다. 피드백의 강도는 *~를 통해 조정되며 값이 0.99로 설정되어 신호가 천천히 감소되도록 한다. 피드백 경로의 필터 주파수는 filter freq 제어 값을 통해 조절되며 이를 통해 소리의 음색을 실시간으로 변경할 수 있다. 피드백 경로에서 clip~는 신호의 진폭을 제한하여 과도한 증폭으로 인한 왜곡을 방지하며 안정적인 신호 처리를 보장한다.

stripnote오브젝트는 note off 메시지를 제거하여 플러킹된 소리가 MIDI 신호의 지속 시간과 무관하게 자연스럽게 사라지도록 한다. 이를 통해 MIDI 입력이 중단되어도 잔향이 유지되며 더욱 자연스러운 사운드를 생성할 수 있다. 최종적으로 생성된 신호는 gain 서브패치로 전달되어 출력 볼륨이 조정되며 스피커로 출력된다. gain을 통해 출력 신호의 크기를 실시간으로 조절할 수 있다.

이 패치는 Karplus-Strong 알고리즘의 원리를 충실히 구현한 구조로 noise~와 rand~오브젝트를 사용한 초기 자극과 tapin~과 tapout~으로 구성된 딜레이 라인 그리고 onepole~필터와 피드백 네트워크를 통해 기타와 같은 플럭 사운드를 효과적으로 재현한다.



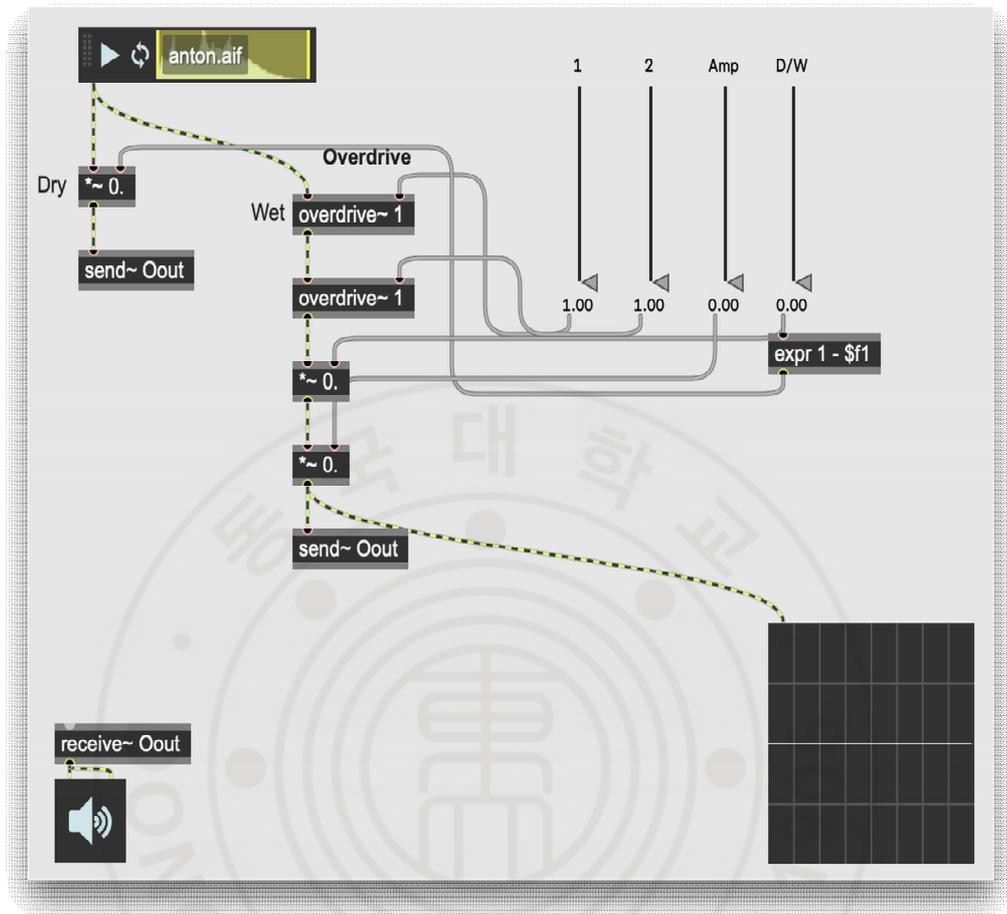
7) overdrive

[그림-31]은 오버드라이브(overdrive)⁷⁷⁾ 효과를 구현하며 웨이브셰이핑(waveshaping)⁷⁸⁾을 통해 입력 신호의 동적 왜곡을 생성하는 과정을 다룬다. 오버드라이브는 입력 신호의 진폭이 디지털 오디오의 범위(± 1)를 초과하도록 처리하여 소프트 클리핑(soft clipping)⁷⁹⁾을 생성한다. 이 과정에서 발생하는 신호의 왜곡은 진공관 앰프의 오버드라이브 효과와 유사하며 따뜻하고 풍부한 음색을 디지털 방식으로 모사한다. 첨부된 패치에서 오버드라이브의 배치와 신호의 흐름은 오버드라이브 효과의 원리를 충실히 구현하며 신호의 왜곡 강도와 dry/wet 신호의 비율을 세부적으로 조작할 수 있도록 설계되었다.

77) 입력 신호를 증폭시켜 디지털 또는 아날로그 한계를 초과하게 만들어 왜곡(distortion)을 유도하는 효과

78) 입력 신호의 파형을 변형하여 음색을 생성하는 신디사이저 합성 기법

79) 신호의 진폭이 특정 임계값을 초과할 때 완전히 잘라내지 않고 부드럽게 제한하는 비선형 처리 방식



[그림-31] overdrive 패치

이 패치의 입력 신호는 sfplay~를 통해 재생된 오디오 파일로부터 시작된다. sfplay~는 오디오 파일을 샘플 단위로 출력하며 이는 오버드라이브 처리를 위한 기초 신호로 사용된다. 입력 신호는 두 개의 경로로 분리되어 각각 dry 신호와 wet 신호로 처리된다. dry 신호는 원래의 신호를 유지하며 wet 신호는 오버드라이브 효과를 적용받는 신호로 구성된다. dry 신호는 *~를 통해 진폭이 조정된 후 send~ Oout 오브젝트로 출력된다.

wet 신호는 두 단계의 오버드라이브를 거치며 각 overdrive~오브젝트로 구현되어 있다. 첫 번째 overdrive~는 1에서 10 범위의 슬라이더 값을 입력받아 약한 왜곡을 적용하며 두 번째 overdrive~는 1에서 100 범위의 슬라이더 값을 통해 강한 왜곡을 생성한다. 두 overdrive~는 서로 다른 왜곡 강도를 출력하며 두 오브젝트의 슬라이더를 통해 신호 왜곡의 세부적인 강도를 조정할 수 있다. 오버드라이브는 입력 신호가 ± 1 의 디지털 오디오 범위를 초과할 때 발생하며 신호의 상한과 하한을 소프트 클리핑하여 따뜻한 왜곡 효과를 만들어낸다.

wet 신호는 오버드라이브 효과가 적용된 후 *~를 통해 다시 진폭이 조정된다. 이 단계에서 dry와 wet 신호의 비율은 `expr 1 - $f1` 오브젝트를 통해 조정되며 wet 신호의 비율을 높이면 dry 신호의 비율은 자동으로 낮아지도록 설계되었다. dry/wet 신호의 비율 조정은 실시간으로 이루어지며 신호의 최종 혼합 결과에 큰 영향을 미친다. wet 신호는 진폭 조정 이후 `send~ Oout`를 통해 최종 출력으로 전달된다.

출력 신호는 `send~ Oout`과 `receive~ Oout`를 통해 연결되어 있으며 이는 오디오 신호가 최종 출력 장치로 전달되기 전에 신호를 안정적으로 관리할 수 있도록 한다. dry와 wet 신호의 혼합 결과는 최종적으로 출력되며 `receive~ Oout`를 통해 출력 신호를 청취할 수 있다.

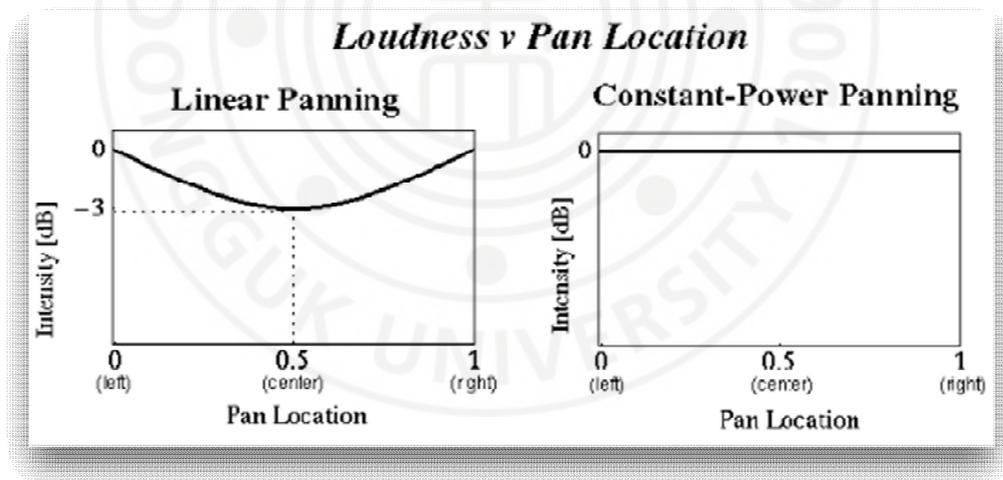
이 패치에서 scope~오브젝트는 신호의 웨이브폼을 시각적으로 표시하여 오버드라이브 효과가 신호에 미치는 영향을 실시간으로 관찰할 수 있도록 한다. 소프트 클리핑은 신호의 상한과 하한을 초과하는 값을 잘라내며 이로 인해 발생하는 웨이브셰이핑을 직관적으로 이해할 수 있다. 오버드라이브 효과는 신호의 RMS⁸⁰⁾ 값이나 피크 레벨(peak level)⁸¹⁾을 실제로 증가시키지는 않지만 신호의 값이 디지털 신호 처리 범위의 상한에 더 많이 도달하도록 만들어 주관적으로 더 큰 음량을 느끼게 한다. 이로 인해 앰프 스케일링이 필요하며 패치에서 출력되는 Amp 컨트롤은 신호의 진폭을 안정적으로 조정하는 데 사용된다.

80) Root Mean Square, 신호의 평균적인 에너지를 계산하는 방법

81) 신호에서 가장 높은 순간적인 진폭

8) cosine panning/constant power panning

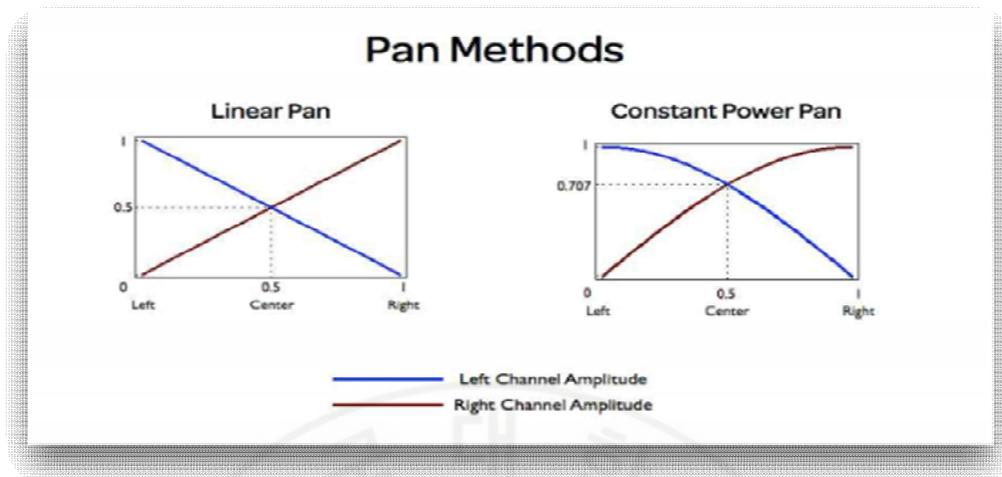
cosine panning⁸²⁾은 코사인 곡선을 기반으로 신호의 좌우 패닝을 처리하는 방식으로 스테레오 필드에서 신호를 안정적으로 분배하며 에너지 균형을 유지하도록 설계된 시스템이다. cosine panning은 중앙점에서 신호 레벨이 과도하게 상승하지 않도록 조정하며 선형 패닝 방식에서 발생할 수 있는 중앙점 에너지 문제를 효과적으로 해결한다. 이는 constant power panning(일정한 전력 패닝) 방식의 한 구현으로 패닝 시 좌우 채널의 총 에너지를 일정하게 유지하며 자연스럽게 부드러운 전환을 연출한다.



[그림-32] linear panning & constant power panning⁸³⁾

82) 오디오 믹싱에서 소리를 스테레오 필드의 왼쪽, 오른쪽 또는 중앙으로 배치하는 기술

83) <https://film-mixing.com/2015/08/22/understanding-stereo-and-surround-pan-laws-in-pro-tools-and-dolby-atmos/>



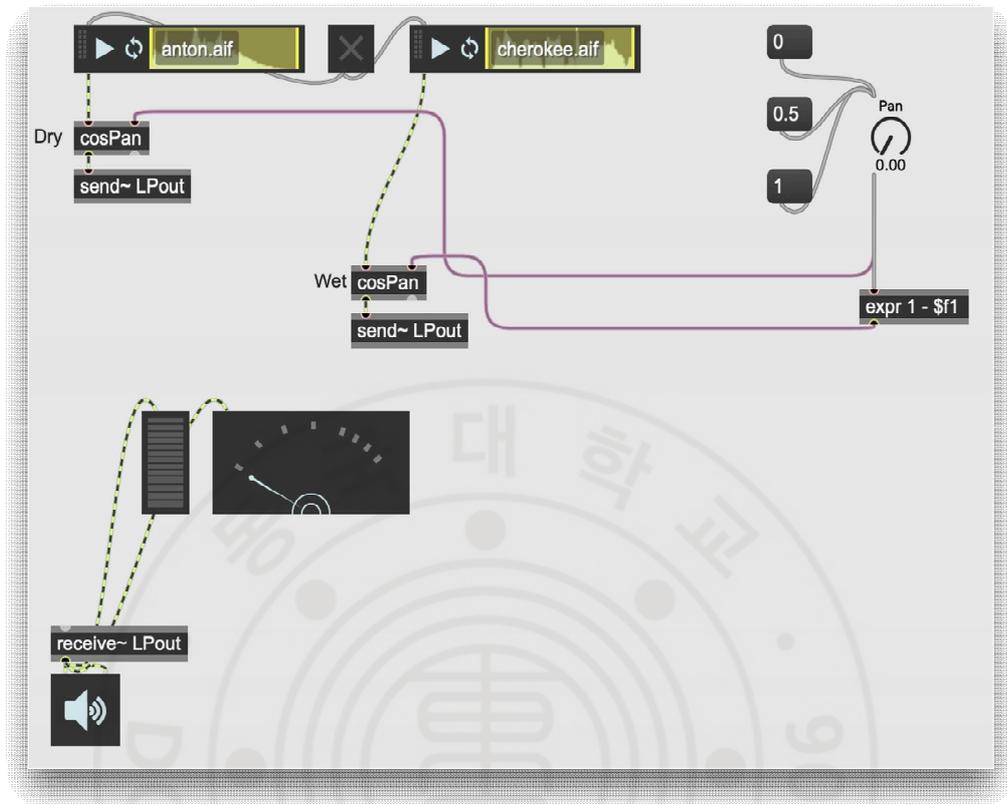
[그림-33] pan method⁸⁴⁾

[그림-35]의 sig~는 제어 데이터를 오디오 신호 형태로 변환하는 오브젝트이다. 입력 값은 0에서 1 사이의 범위를 가지며 이는 좌우 패닝의 위치를 나타낸다. 0은 완전히 왼쪽, 0.5는 중앙, 1은 완전히 오른쪽을 의미한다. 이 값은 실시간으로 업데이트되어 패닝 처리가 동적으로 이루어질 수 있도록 한다. 변환된 신호는 두 개의 cos~오브젝트로 전달된다. cos~는 입력 신호를 코사인 곡선을 기반으로 처리하여 좌우 채널의 레벨을 계산한다. 첫 번째 cos~는 좌채널의 레벨을 계산하며 두 번째 cos~는 동일한 입력 신호를 사용하지만 위상⁸⁵⁾을 90도 이동하여 우채널의 레벨을 계산한다. 이 두 값은 코사인 함수⁸⁶⁾의 성질에 따라 항상 에너지 합이 일정하게 유지되도록 설계되어 있다.

84) <https://film-mixing.com/2015/08/22/understanding-stereo-and-surround-pan-laws-in-pro-tools-and-dolby-atmos/>

85) 파형의 특정 지점을 기준으로 상대적인 위치를 나타내며 일반적으로 각도로 표현(0°에서 360°)

86) 삼각함수 중 하나로 직각삼각형에서 인접 변과 빗변의 비율



[그림-34] cosine panning 패치

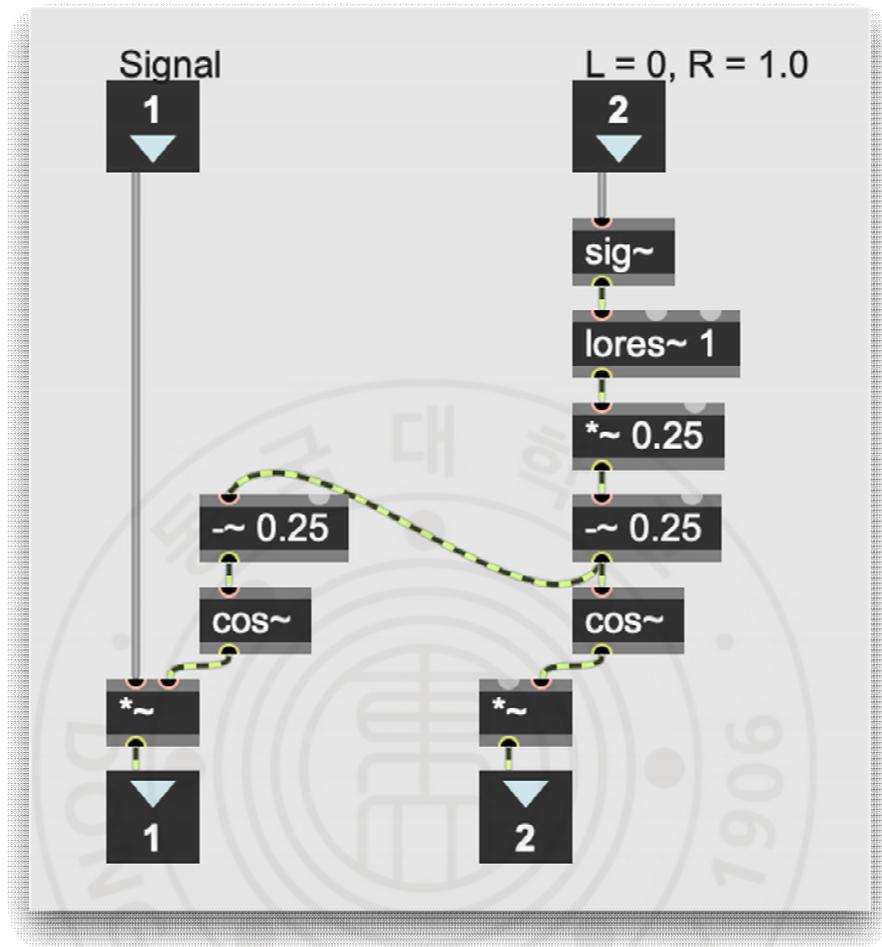
입력 신호는 lores~오브젝트를 통해 필터링된다. lores~는 저역 통과 필터로 고주파⁸⁷⁾ 성분을 감쇠시켜 신호를 부드럽게 만든다. 이는 입력 신호가 너무 날카롭거나 왜곡되지 않도록 안정성을 제어하는 역할을 한다. 필터링된 신호는 각각의 패닝 레벨과 결합되기 전에 ~ 0.25 를 통과한다. ~ 0.25 는 입력 신호의 진폭을 1/4로 줄이는 역할을 한다. 이는 패닝 과정에서 좌우 채널의 레벨이 합산될 때 총 신호 에너지가 과도하게 상승하지 않도록 하기 위한 조치이다.

87) 음향, 전자기파 또는 신호에서 높은 주파수 대역

코사인 기반 패닝에서는 두 채널의 에너지가 중앙점에서 겹치기 때문에 정규화 과정을 통해 이를 보완하여 에너지 균형을 유지한다. 특히 진폭을 0.25로 줄이는 이유는 두 채널의 최대 에너지가 합산될 경우에도 신호가 디지털 오디오의 허용 범위 (예: -1에서 1 사이)를 초과하지 않도록 보장하기 위함이다.

필터링되고 정규화된 신호는 *~에서 cos~의 출력과 결합된다. 첫 번째 *~는 좌채널 신호를 생성하고 두 번째 *~는 우채널 신호를 생성한다. 각 오브젝트는 cos~에서 계산된 레벨 값과 필터링된 신호를 곱하여 좌우 채널의 최종 신호를 출력한다. 좌우 채널로 나뉜 신호는 각각 out~오브젝트로 전달되며 이는 메인 패치로 반환되어 최종적으로 스테레오 필드에서 신호가 분배된다.

CosPan 서브패치는 입력 신호의 좌우 비율을 동적으로 조정하며 코사인 곡선의 특성을 활용해 중앙점에서 신호의 레벨이 과도하게 상승하거나 감소하지 않도록 한다. 좌채널의 레벨은 $\cos(\theta)$, 우채널의 레벨은 $\sin(\theta)$ 로 계산되며 두 값의 제곱 합이 항상 1로 일정하게 유지된다. 이는 에너지가 일정하게 유지되는 constant power panning 방식의 핵심 원리이며 스테레오 필드에서 자연스럽게 부드러운 패닝을 한다.



[그림-35] cosine panning 서브 패치

이 서브 패치는 입력 신호를 좌우로 안정적으로 분배할 뿐 아니라 에너지 균형을 유지하고 신호 왜곡을 방지하기 위한 여러 단계의 처리를 포함하고 있다. 신호의 정규화는 디지털 오디오에서 신호 클리핑을 방지하고 에너지 균형을 유지하기 위한 중요한 과정이다. 필터링, 정규화, 코사인 곡선 계산, 좌우 신호의 결합 과정을 통해 CosPan 서브 패치는 안정적이고 자연스러운 스테레오 패닝을 구현하며 이를 메인 패치와 통합하여 최종적으로 청취자에게 균형 잡힌 스테레오를 연출한다.

V. 연구 기술의 작품 적용

1. 작품 소개

본 연구를 적용한 멀티미디어 작품 <Splinters of Light: 빛의 파편>은 사운드 디자인을 통해 무용수의 움직임과 음악적 요소를 실시간으로 상호작용하도록 설계되어 2024년 11월 9일 동국대학교 이해랑 예술극장에서 진행된 ‘SEEING SOUND, LISTENING IMAGE(보는 소리, 듣는 영상) 2024’에서 초연되었다.



[그림-36] 공연 무대 사진 (측면)

작품 <Splinters of Light: 빛의 파편>은 디지털 기술과 인간 감각의 융합을 통해 인터랙티브 멀티미디어 퍼포먼스를 구현하고자 한다. 소리, 움직임, 시각적 요소가 실시간으로 상호작용하는 이 작품은 빛의 산란과 파편처럼 흩어진 기억과 감정에서 영감을 얻었다. 작품의 주제는 단순한 시청각적 자극을 넘어서 다양한 감각 요소들이 통합되어 몰입형 경험을 창출하는 새로운 형태의 예술적 시도를 담고 있다. 이러한 시도는 기술적 구현과 감각적 경험이 결합된 독창적 접근 방식으로 관객과의 새로운 상호작용을 모색한다.

작품의 철학적 기초는 <로이 아스콧>(Roy Ascott, 1934~)⁸⁸⁾과 <마르샬 맥루한>(Marshall McLuhan, 1911~1980)⁸⁹⁾의 이론에서 비롯되었다. 로이 아스콧은 디지털 아트를 변환의 예술로 정의하며 관객과 작품이 상호작용을 통해 심미적 가치를 공동으로 창출하는 가능성을 강조하였다. 마르샬 맥루한은 매체 자체가 메시지라는 관점에서 기술이 인간의 감각과 인식을 어떻게 확장하는지를 논하였다. 이러한 철학적 관점은 작품 제작 과정에서 기술적 구현을 단순한 도구적 역할에 머무르게 하지 않고 예술적 경험의 본질을 탐구하는 과정으로 확장하는 데 기여하였다.

작품 제작은 막형 전위차계(SoftPot membrane potentiometer)와 압력 센서(FSR, force sensitive resistor)를 활용한 리본 신스 악기의 설계와 개발에서 시작되었다. 이 악기는 연주자의 손 움직임과 압력을 감지하여 소리의 피치, 필터, 이펙터 등 다양한 음악적 요소를 실시간으로 제어할 수 있도록 설계되었다. 데이터 처리는 Max/MSP를 통해 이루어지며 생성된 소리는 터치디자이너를 통해 시각적 요소로 변환된다.

88) 사이버네틱스와 텔레매틱스 아트를 개척하고 예술과 기술, 의식의 융합을 탐구한 영국의 예술가이자 이론가, 교육자

89) 캐나다의 미디어 이론가이자 문화 비평가

특히 optical flow⁹⁰⁾ 기술과 오디오 스펙트럼 분석을 활용하여 무용수의 움직임과 음악적 요소가 실시간으로 유기적으로 결합되도록 설계되었다.

작품의 구조는 소리와 시각적 요소가 점진적으로 결합하며 몰입감을 증대시키는 형태로 구성되어 있다. 이러한 접근은 <모리스 베자>(Maurice Béjart, 1927~2007)⁹¹⁾의 발레 공연에서 보여지는 다감각적 표현이나 <마르셀 뒤샹>(Marcel Duchamp, 1887~1698)⁹²⁾의 다중 매체적 접근과 유사성을 가지며 현대적으로는 <라파엘 로자노-헤메르>(Rafael Lozano-Hemmer, 1967~)⁹³⁾의 인터랙티브 설치 작품과도 연결될 수 있다. 그러나 본 작품은 퍼포먼스 아트의 영역에서 실시간 데이터 흐름을 통해 음악적 표현과 시각적 효과를 동시에 구현하며 기존의 작품들과 차별성을 둔다.

이 작품은 디지털 기술과 인간 감각의 상호작용을 심화시키며 단순히 기술적 혁신을 넘어 관객의 경험을 재구성하는 데 초점을 맞춘다. 상호작용적 구조를 통해 관객과 퍼포머가 공동으로 의미를 창출하는 과정을 보여주며 이는 미디어 아트가 가지는 본질적인 참여성과 확장성을 잘 드러낸다. 특히 인간 감각의 비선형적 특성과 디지털 데이터의 선형적 특성 간의 간극을 조정하는 기술적 시도는 작품의 심미적 가치를 높이며 디지털 인터페이스와 예술적 표현의 새로운 가능성을 제시한다.

90) 연속된 영상 프레임에서 각 픽셀의 밝기 변화를 분석하여 픽셀의 이동 벡터를 계산하고 이를 통해 물체의 움직임을 추정하는 기술

91) 스위스 로잔의 베자르 발레단을 운영했던 프랑스의 무용수, 안무가, 오페라 감독

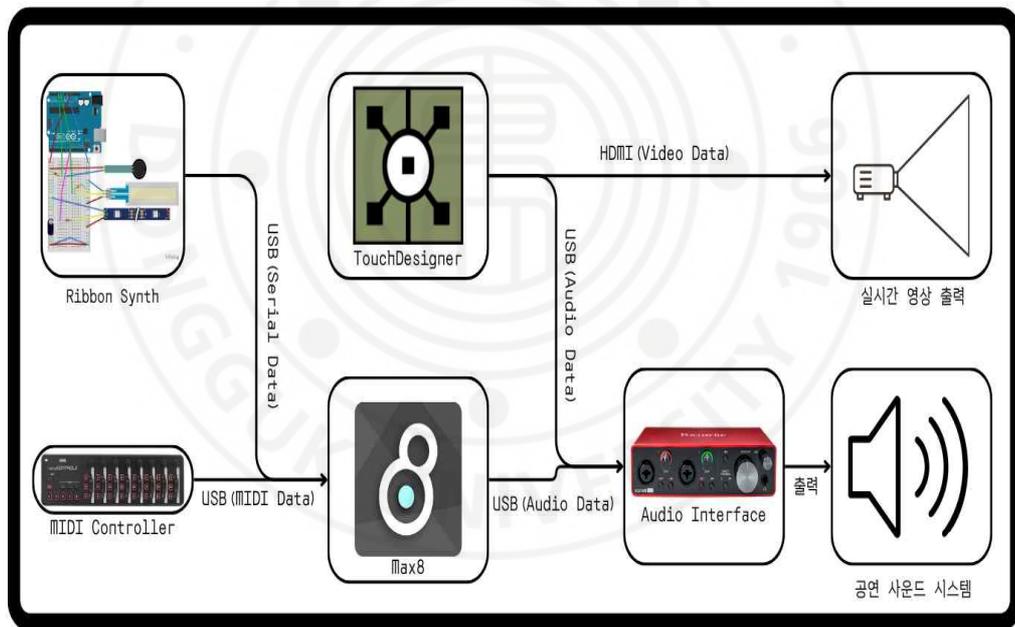
92) 프랑스 출신의 미국 예술가, 다다이즘과 초현실주의 운동에 큰 영향을 미쳤으며 현대 미술의 개념을 근본적으로 바꾼 인물

93) 멕시코 출신의 현대 미술가 겸 뉴미디어 아티스트

2. 작품 구성

1) 공연 시스템 및 무대 설계

[그림-37]은 작품 <Splinters of Light: 빛의 파편> 구현하는 시스템을 도식화 한 것이다.

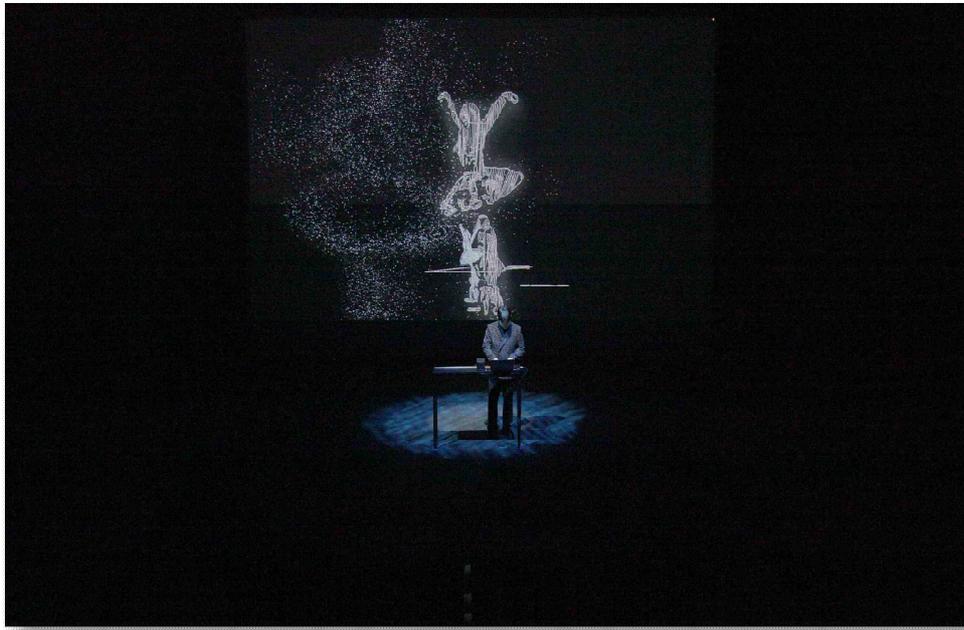


[그림-37] 공연 시스템

본 연구의 공연 시스템은 다양한 디지털 장치와 소프트웨어를 통합하여 기술과 예술적 표현이 결합된 몰입형 멀티미디어 퍼포먼스를 가능하게 한다. 시스템의 신호 흐름은 아두이노 우노와 MIDI Controller에서 시작된다. 아두이노 우노는 센서를 통해 수집한 데이터를 USB를 통해 Max/MSP 소프트웨어로 전송한다. 이는 공연자의 움직임이나 상호작용을 실시간으로 디지털 데이터로 변환하여 퍼포먼스의 핵심적인 입력 신호로 제어된다. MIDI controller는 추가적으로 USB를 통해 Max/MSP으로 데이터를 전송하며 이는 음악적 제어 값을 조정하거나 추가적인 상호작용을 구현하기 위해 사용된다.

Max/MSP은 시스템의 중심 소프트웨어로 아두이노 우노와 MIDI controller에서 수집한 데이터를 통합적으로 처리한다. Max/MSP은 음악적 신호를 생성하고 이를 조작하며 USB를 통해 오디오 인터페이스로 출력한다. 동시에 터치디자이너는 공연의 시각적 요소를 생성한다. 이러한 시각적 데이터는 터치디자이너에서 실시간으로 처리되어 HDMI 포트를 통해 프로젝터로 출력된다. 이를 통해 무대 뒤 대형 화면에 공연의 시각적 표현이 투영되며 움직임, 빛, 소리의 상호작용이 시각적으로 표현된다.

오디오 데이터는 Max/MSP에서 오디오 인터페이스로 전달되어 디지털 신호를 아날로그 신호로 변환한다. 이 변환된 신호는 공연장의 사운드 시스템으로 전송되며 스피커를 통해 실시간으로 관객에게 전달된다. 이러한 구조는 사운드와 시각적 요소가 긴밀히 연결된 공연 환경을 연출하며 관객에게 몰입감 있는 청각적, 시각적 경험을 선사한다.



[그림-38] 공연 무대 사진 (정면)

무대 구성은 빛과 어둠의 대비를 통해 작품의 중심 메시지와 감각적 몰입감을 극대화하도록 설계되었다. 전체적인 무대는 어둡게 설정되었으며 이는 중심 연주자와 시각적 요소에 더욱 집중할 수 있는 환경을 연출한다. 특히 연주자가 위치한 공간에는 원형 조명이 집중적으로 비춰져 연주자의 역할과 퍼포먼스의 중요성을 부각시킨다. 이러한 조명 연출은 무대와 화면 사이의 경계를 허물고 관객이 중심에 몰입할 수 있는 초점 역할을 한다.

연주자는 무대 중앙에 자리 잡고 있으며 그 뒤로 배치된 대형 디지털 화면은 작품의 시각적 메시지를 전달하는 주요 매체로 작용한다. 디지털 화면은 움직임과 소리가 실시간으로 상호작용하며 빛의 흐름과 잔상, 입자 움직임을 시각화한다.

이는 단순히 시각적 장치에 그치지 않고 소리와 빛이 융합되어 감각적이고 역동적인 경험을 만들어내는 매개체로 기능한다. 이와 같은 구성은 디지털 매체와 퍼포먼스의 통합을 통해 예술과 기술의 상호작용을 구현하며 작품의 주제와 메시지를 강화한다.

빛과 입자의 흐름은 단순히 시각적 효과로 머무르지 않고 관객의 감각과 상호작용하며 예술적 메시지를 전달하는 상징적 요소로 자리한다.

무대 구성은 미니멀리즘적 접근을 통해 작품의 핵심 메시지에 더욱 집중할 수 있도록 설계되었다. 연주자와 디지털 화면, 조명을 제외한 다른 시각적 요소는 배제되어 있으며 이는 관객이 불필요한 요소에 분산되지 않고 작품의 본질에 몰입할 수 있는 환경을 조성한다. 이러한 단순함은 기술적 복잡성과 예술적 정교함 사이의 균형을 유지하며 작품의 철학적 의미를 더욱 강조한다.

연주자는 테이블 위에 배치된 장비를 통해 실시간으로 소리와 시각적 효과를 조작하며 기술과 예술의 통합을 직접적으로 보여준다. 연주자의 행위는 기술적 통제와 예술적 즉흥성이 결합된 형태로 관객에게 순간적으로 생성되는 새로운 경험을 제공한다. 이는 예술이 기술적 도구를 통해 확장될 수 있는 가능성을 탐구하며 기술과 인간의 창조적 상호작용을 예술적 형태로 시각화한다.

2) 음악 구성

<표-12> 음악 구성

섹션	사운드 디자인(sound design)
A	FM synthesis, overdrive, FDN digital reverb
B	PM&FM synthesis, Karplus-Strong string synthesis
C	FM synthesis, wavetable synthesis, rhythm sequencer
D	wavetable synthesis, FDN digital reverb
E	FM synthesis, overdrive, FDN digital reverb

작품의 음악 구성은 테이프음악(tape-music)의 개념을 바탕으로 조성 없이 설계되었으며 각 섹션이 독립적으로 다양한 사운드 디자인 기술을 통해 구현되었다. 다음은 작품의 음악 구성에 대한 상세 설명이다.

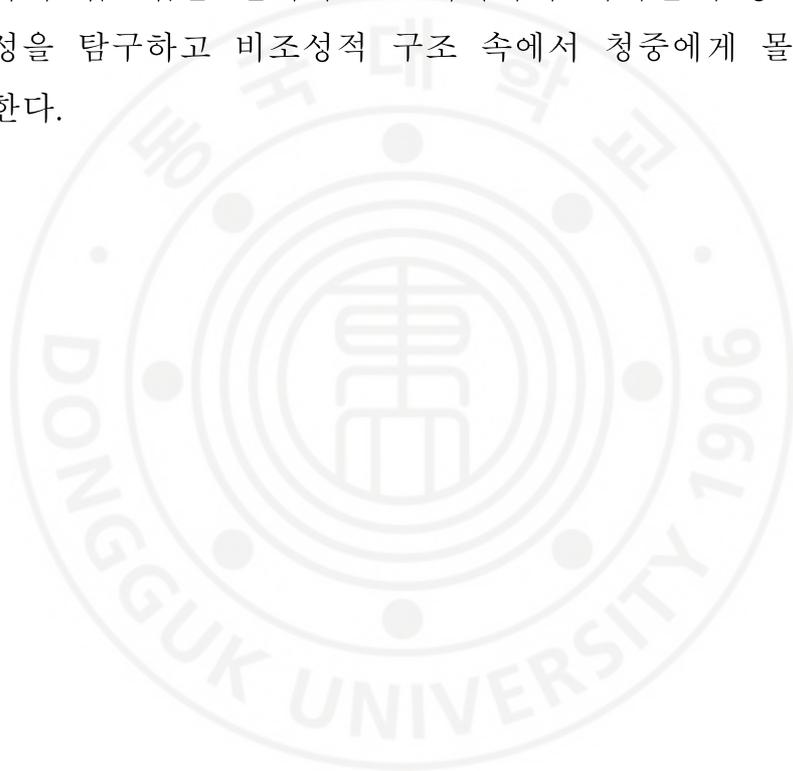
- (1) A 섹션 : FM을 활용하여 인덱스의 변조를 통해 비명과 같은 고조된 소리를 연출한다. 이 과정에서 overdrive가 적용되어 소리에 왜곡을 더하여 극적인 감정을 전달한다. 동시에 FDN digital reverb가 추가되어 잔향이 강조되며 이는 공간적인 깊이를 부여한다. 이 파트는 작품의 도입부로서 청각적으로 강렬하고 주의를 끄는 역할을 한다.

- (2) B 섹션 : PM&FM을 기반으로 설계되었으며 비교적 조용한 분위기를 특징으로 한다. Karplus-Strong string synthesis를 활용하여 짧고 타격적인 소리와 글리치(glitch)⁹⁴⁾한 질감을 가진 사운드가 나타난다. 이 파트는 청각적으로 긴장을 낮추는 동시에 청중에게 새로운 텍스처를 제시하며 A 파트와 대조되는 분위기를 형성한다.
- (3) C 섹션 : FM과 웨이브테이블이 결합되어 다층적인 사운드를 형성한다. rhythm sequencer를 통해 드럼 패턴과 리듬 요소가 도입되며 이는 비조성적 구성을 유지하면서도 약간의 구조감을 연출한다. 이 부분은 청중에게 리듬적 흥미를 유발하며 작품의 전개를 역동적으로 만드는 역할을 한다.
- (4) D 섹션 : 웨이브테이블과 FDN digital reverb를 사용하여 풍부한 공간감을 창출한다. 리버브의 잔향이 강조되어 사운드가 넓고 확장된 공간에 퍼지는 듯한 효과를 준다. 이 섹션은 작품의 정점으로 몰입감 있는 음향적 경험을 제어하며 감정적 고조를 극대화한다.
- (5) E 섹션 : FM을 중심으로 구성되며 인텍스의 양을 점차적으로 줄이고 리버브의 양을 감소시키면서 서서히 페이드 아웃(fade-out)⁹⁵⁾된다. 이 과정은 작품의 마무리로서 자연스럽게 청중을 작품의 끝으로 이끌며 잔잔한 여운을 남긴다. overdrive는 최소화되어 소리가 점차 부드러워지고 리버브는 공간감을 줄이며 마무리감을 강화한다.

94) 디지털 기기나 소프트웨어의 일시적인 오류로 인해 발생하는 특유의 사운드

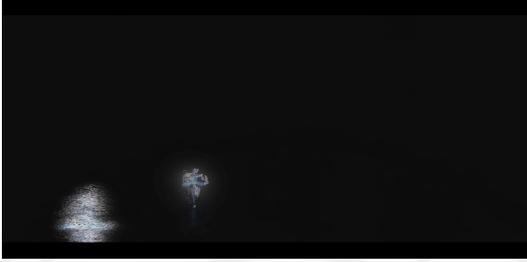
95) 소리나 영상이 점차적으로 작아지거나 어두워지는 효과

본 연구의 음악 구성은 비조성적 구조를 기반으로 다양한 합성 기법과 음향 디자인을 통해 각 섹션이 독립적으로도 강한 개성을 가지면서도 전체적으로 조화를 이루도록 설계되었다. FM 합성과 웨이브테이블합성은 주된 음향적 도구로 활용되었으며 reverb와 overdrive와 같은 효과는 각 섹션의 텍스처와 감정을 조율하는 데 중요한 역할을 한다. 작품의 각 파트는 테이프 음악적 접근법을 현대적으로 해석하여 디지털 음향 설계의 가능성을 탐구하고 비조성적 구조 속에서 청중에게 몰입감을 유도한다.



3) 영상 구성

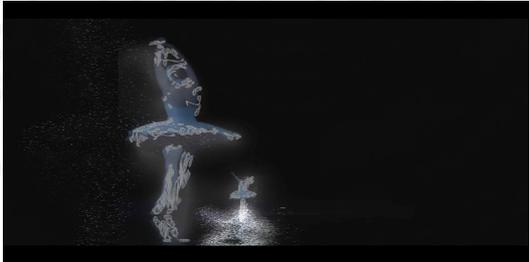
<표-13.1> 영상 구성 (1)

섹션	이미지	의미
A		무용수의 등장과 빛의 잔상으로 시작되는 서막
B		빛과 무용수의 확장을 통해 융합과 상호작용을 강조

(1) A 섹션 : 무용수가 화면의 왼쪽에서 작고 은은한 형태로 등장한다. 무대는 어둡고 고요하며 무용수의 주변에는 빛의 작은 입자와 잔상이 따라온다. 이러한 연출은 무용수가 빛을 끌어당기는 듯한 느낌을 준다. 무용수의 움직임은 느리고 부드러우며 이는 FM합성으로 생성된 음향의 날카로운 비명과 상반되는 대조를 이루어 관객의 시선을 무용수에게 집중시킨다. 이 섹션은 공연의 서막을 알리며 시각적 요소와 음악적 요소의 초기 융합을 보여준다.

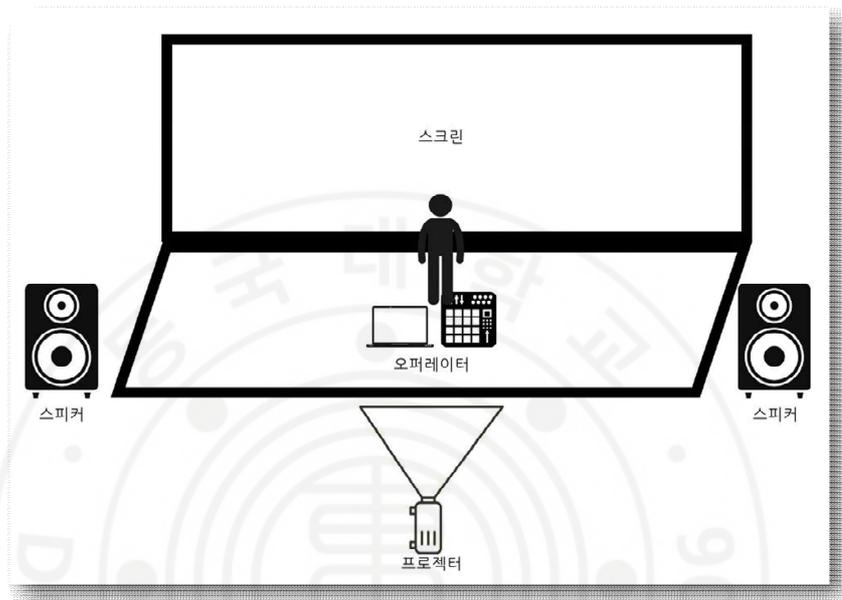
(2) B 섹션 : 무용수의 존재감이 커지며 화면의 중앙으로 확대된다. 무용수를 중심으로 빛과 잔상이 점차적으로 퍼져 나가며 마치 물결이 확장되는 듯한 이미지를 형성한다. 이 섹션의 시각적 표현은 무용수와 빛이 상호작용하며 하나의 유기체로 융합되는 느낌을 전달한다. 짧고 글리치한 타격음과 함께 빛의 움직임은 더욱 세밀하고 섬세해지며 관객에게 무용수와 시각적 요소가 하나로 연결된 몰입감을 연출한다.

<표-13.2> 영상 구성 (2)

섹션	이미지	의미
C		음악적 리듬과 시각적 요소가 다이내믹
D		잔향과 착시를 통해 초현실적이고 혼란스러운 공간감을 조성
E		점진적 축소와 퇴장으로 여운을 남기며 조용히 마무리

- (3) C 섹션 : 역동적이고 에너지가 넘치는 분위기로 전환된다. 빛과 잔상은 점, 선, 그리고 패턴 형태로 무용수 주변뿐 아니라 화면 전체로 확장되며 음악의 리듬과 박자에 따라ダイナ믹하게 움직인다. 드럼 시퀀서로 생성된 리듬은 시각적 요소의 변화를 주도하며 무용수의 움직임은 시각적 요소와의 상호작용보다 독립적으로 보인다. 이 섹션은 기술적 정교함과 감각적 자극을 극대화하여 공연의 중간 클라이맥스를 형성한다.
- (4) D 섹션 : 잔향과 혼란스러운 요소가 강조되며 시각적 착시를 통해 무용수가 여러 명으로 보이는 듯한 효과가 만들어진다. 빛과 잔상은 무대 전체를 뒤덮으며 무용수의 움직임은 복제된 듯한 여러 형상으로 분산되어 나타난다. 이러한 시각적 효과는 공간감과 초현실적인 분위기를 강조하며 관객에게 현실과 비현실 사이의 경계를 흐리게 하는 경험을 연출한다. 이 섹션은 공연의 감정적, 시각적 절정을 이룬다.
- (5) E 섹션 : 무용수의 움직임이 점차 줄어들며 시각적 요소와의 상호작용도 감소한다. 빛과 잔상은 서서히 사라지고 무용수는 화면의 왼쪽으로 천천히 퇴장한다. 리버브의 양이 줄어들고 FM합성의 인덱스 조절을 통해 음악은 점진적으로 페이드아웃된다. 이는 공연의 마무리로 관객에게 여운과 함께 조용한 끝맺음을 선사한다.

4) 무대 구성



[그림-39] 무대 구성

무대 구성은 시각적, 청각적 요소를 통합하여 몰입형 공연을 가능하게 하는 구조로 설계되었다. 무대 중앙에는 오퍼레이터가 위치하며 오퍼레이터는 컴퓨터와 리본 신스와 MIDI 컨트롤러를 통해 실시간으로 공연의 사운드와 비주얼을 조작한다.

무대 뒤쪽에는 대형 스크린이 설치되어 있으며 이는 프로젝터를 통해 영상 데이터를 출력한다. 스크린은 공연의 주요 시각적 요소를 표현하는 매체로 활용되며 관객의 시선을 집중시키는 역할을 한다.

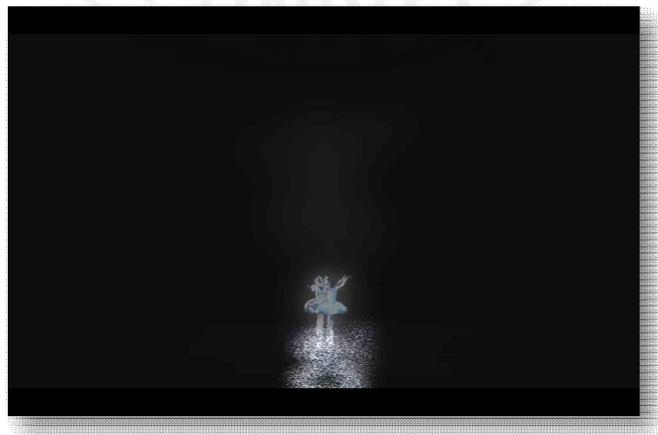
3. 작품에서의 사운드 및 영상 기술 적용

1) A 섹션

<표-14> A 섹션에 적용된 사운드 프로세싱 및 영상 효과

섹션	사운드 프로세싱	주제	영상 효과
A	FM synthesis overdrive FDN digital reverb	긴장의 도입: 소리와 빛의 첫 만남	무용수의 등장과 빛의 잔상으로 시작되는 서막

A 섹션은 FM합성을 활용해 인덱스 변조를 통해 날카로운 비명을 연상시키는 고조된 소리를 생성하며 overdrive를 통해 왜곡된 음향으로 극적인 긴장을 형성한다. FDN 디지털 리버브는 공간적 깊이를 더하며 서막으로서 공연의 분위기를 설정한다. 시각적으로는 무용수가 왼쪽에서 은은히 등장하며 잔잔히 퍼져 나가는 빛의 잔상이 함께 표현된다. 이 조합은 관객의 몰입감을 높이며 무대의 철학적 주제 즉 소리와 빛의 융합을 암시한다.



[그림-40] A 섹션

2) B 섹션

<표-15> B 섹션에 적용된 사운드 프로세싱 및 영상 효과

섹션	사운드 프로세싱	주제	영상 효과
B	PM&FM synthesis Karplus-Strong string synthesis	확장된 연결: 중심으로의 집중	빛이 상호작용하며 하나의 유기체로 융합

B 섹션에서는 PM과 FM합성 기법에 Karplus-Strong string합성을 결합하여 짧고 타격적인 글리치 사운드를 생성한다. 이 소리는 긴장을 낮추고 새로운 음색 텍스처를 제시하며 시각적으로 무용수가 화면 중앙으로 확대되고 빛과 잔상이 무용수를 중심으로 퍼져 나가는 연출과 조화를 이룬다. 이 섹션은 철학적으로 관객과 작품이 중심으로 함께 몰입되는 순간을 상징하며 몰입의 확장성을 표현한다.



[그림-41] B 섹션

3) C 섹션

<표-16> C 섹션에 적용된 사운드 프로세싱 및 영상 효과

섹션	사운드 프로세싱	주제	영상 효과
C	FM synthesis wavetable synthesis rhythm sequencer	조화와 리듬의 창조: 인간과 기술의 상호작용	빛과 잔상은 점, 선, 그리고 패턴 형태

C 섹션에서는 FM합성과 웨이브테이블합성을 활용해 다층적 음향을 생성하며 리듬 시퀀서를 통해 드럼 패턴과 리듬 요소를 도입한다. 특히 막형 전위차계와 압력 센서로 구성된 리본 신스를 활용해 테이프음악과 함께 연주된다. 리본 신스는 연주자의 손의 움직임과 압력을 실시간으로 감지하며 이 데이터를 Max/MSP에서 처리해 음색의 세부적 조작을 가능하게 한다. 시각적으로는 점, 선, 패턴이 역동적으로 움직이며 음악의 리듬과 다이내믹을 강화한다.



[그림-42] C 섹션

4) D 섹션

<표-17> D 섹션에 적용된 사운드 프로세싱 및 영상 효과

섹션	사운드 프로세싱	주제	영상 효과
D	wavetable synthesis FDN digital reverb	혼란과 복제: 현실과 비현실의 경계	무용수의 움직임은 복제되어 여러 형상으로 분산

D 섹션은 웨이브테이블합성과 FDN 디지털 리버브를 활용하여 초현실적 공간감을 연출하며 잔향 효과를 극대화한다. 리본 신스는 이 섹션에서 역시 중요한 역할을 하며 연주자는 센서를 통해 잔향과 필터를 조작해 혼란스러운 음향 효과를 강화한다. 테이프음악의 왜곡된 사운드와 리본 신스의 실시간 연주는 무용수의 움직임과 복제된 듯한 잔상 효과와 결합되어 착시를 만들어낸다.



[그림-43] D 섹션

4) E 섹션

<표-18> E 섹션에 적용된 사운드 프로세싱 및 영상 효과

섹션	사운드 프로세싱	주제	영상 효과
E	FM synthesis overdrive FDN digital reverb	감각의 소멸: 여운과 마무리	무용수의 움직임이 점차 줄어들며 시각적 요소와의 상호작용도 감소

E 섹션에서는 리본 신스를 활용해 FM합성을 점진적으로 조절하며 테이프 음악과의 조화 속에서 리버브와 인덱스 양을 줄여나간다. 소리는 점차 페이드 아웃되고 시각적 요소와 무용수의 움직임 또한 서서히 축소되며 무용수가 무대를 퇴장한다. 이는 감각적 여운을 남기며 공연을 마무리하는 역할을 한다. 이 섹션은 끝맺음의 철학적 주제를 담아 감각의 소멸과 새로운 시작의 가능성을 상징적으로 표현한다.



[그림-44] E 섹션

4. 연구 기술의 작품 적용과 예술적 효과

작품 <Splinters of Light: 빛의 파편>은 사운드와 시각적 매체를 융합하여 관객에게 다감각적 경험을 제공하는 멀티미디어 퍼포먼스이다. 작품에서 사운드는 FM합성과 웨이브테이블합성 등을 활용하여 다층적이고 풍부한 음향을 생성한다. 막형 전위차계와 압력 센서를 기반으로 설계된 리본 신스는 연주자의 손 움직임과 압력을 감지하여 피치, 진폭, 필터링 등을 실시간으로 조절할 수 있도록 한다. 이러한 데이터는 아두이노를 통해 디지털화되어 Max/MSP로 전달되며 로그 스케일링 등의 매핑 기술을 활용하여 센서 출력이 인간의 지각 특성과 자연스럽게 정렬된다. 이는 즉각적이고 직관적인 인터랙션을 가능하게 한다. FDN 리버브와 오버드라이브와 같은 음향 효과는 공간적 깊이와 극적인 표현을 강화하며 관객의 몰입을 극대화한다.

시각적 요소는 터치디자이너를 활용하여 실시간으로 생성된다. optical flow algorithms은 무용수의 움직임을 분석하여 이를 빛의 잔상, 점 구름, 추상적 형상 등으로 변환하며 음악적 요소와의 동기화를 통해 시각적 표현의 유기성을 강화한다. 터치디자이너에서 분석된 주파수와 진폭 데이터는 밝기, 입자 밀도, 움직임 강도와 같은 시각적 제어 값에 실시간으로 반영된다. 이를 통해 소리와 비주얼 간의 긴밀한 상호작용이 구현되며 대형 스크린에 투사된 프로젝션은 공연 서사의 정서적 깊이를 더한다.

작품은 관객 몰입도를 증대시키는 데 중점을 둔다. 센서, 오디오, 비주얼 간의 실시간 상호작용은 관객에게 다감각적 경험을 제공하며 인간의 제스처와 디지털 결과물이 긴밀하게 연결되는 모습을 보여준다. 이는 물리적 세계와 디지털 세계 간의 상호작용을 강조하며 인간-기계 협력의 새로운 가능성을 탐구한다. 또한 공연은 전통적인 테이프음악(tape-music)을 현대 기술로 재해석하며 움직임과 사운드에서 파생된 시각적 요소는 작품의 철학적 개념인 '빛의 파편'을 시적으로 표현한다.



VI. 결 론

본 논문은 디지털 기술과 예술적 상상력을 결합하여 새로운 형태의 미디어 아트를 제시하려는 시도로 리본 신스를 중심으로 한 신디사이저와 무용 그리고 시각적 요소가 융합된 몰입형 퍼포먼스를 구현하였다. 작품 <Splinters of Light: 빛의 파편>은 터치와 압력을 기반으로 한 리본 신스를 활용하여 소리의 주요 파라미터를 제어하며 Max/MSP를 통해 음악적 요소를 창작하고 이를 터치디자이너와 결합하여 무용수의 움직임과 실시간으로 상호작용하는 시각적 경험을 연출하였다. 이는 인간 감각의 비선형적 특성과 디지털 기술 간의 융합을 탐구하는 중요한 사례로 현대 미디어 아트와 인터랙티브 퍼포먼스에서 디지털 기술의 창의적 활용 가능성을 보여준다는 점에서 의의가 크다.

리본 신스를 활용한 악기 제작은 단순한 데이터 처리의 수준을 넘어 연주자의 물리적 움직임을 음악적 표현으로 변환하며 이를 시각적 피드백과 결합하여 다감각적 몰입을 연출한다. 특히 막형 전위차계(SoftPot membrane potentiometer)와 압력 센서(FSR, force sensitive resistor)를 활용한 입력 데이터는 실시간으로 신디사이저의 다양한 파라미터에 반영되며 터치디자이너를 통해 음악과 무용수의 움직임에 따라 변화하는 시각적 요소를 생성함으로써 기술과 예술이 유기적으로 연결된 새로운 창작 방식을 제시하였다. 이는 단순한 기술적 구현이 아니라 인간의 몸과 디지털 환경이 상호작용하는 과정을 탐구하는 작업으로 미디어 아트에서 기술이 가지는 예술적 가능성을 실질적으로 확장시킨 사례로 평가될 수 있다.

또한 본 연구는 리본 신스를 중심으로 한 악기가 단순히 음악적 제어 도구에 그치지 않고 시각적 요소와 결합된 퍼포먼스에서 상호작용적 매개체로 작용할 수 있음을 보여주었다. 관객은 무용수의 움직임과 음악 그리고 변화하는 시각적 요소 간의 상호작용을 통해 단순히 감상자로서 머무르지 않고 작품과 능동적으로 연결되는 경험을 할 수 있다. 이와 같은 다감각적 퍼포먼스는 단순히 시청각적 자극을 연출하는 데 그치지 않고 디지털 기술을 통해 감각적 경험의 깊이를 확장하고 관객과 작품 사이의 새로운 관계를 형성할 수 있는 가능성을 제시하였다.

그러나 이러한 성과에도 불구하고 본 논문은 여러 한계를 지닌다. 우선 작품의 기술적 구현 과정과 데이터 처리 방식에 초점을 맞추는 동안 예술적 표현과 감각적 경험의 심화에 대한 철학적이고 미학적인 논의는 부족하였다. 작품 <Splinters of Light: 빛의 파편>이 기술적 실험의 맥락에서 중요한 시도임에는 틀림없으나 관객의 감각적 경험과 심미적 반응이 작품에서 어떤 방식으로 구성되었는지 그리고 그것이 미디어 아트의 철학적 맥락에서 어떤 의미를 가지는지에 대한 논의가 충분히 이루어지지 않았다. 예술 작품은 기술적 구현을 넘어 인간과 세계 간의 새로운 관계를 형성하는 데 목적을 두어야 하지만 본 연구는 그러한 관점에서의 심화된 논의가 부족했다는 점에서 한계를 보였다.

또한 관객의 역할에 대한 논의가 미흡하였다. 미디어 아트는 관객의 참여를 통해 의미가 구성되고 작품이 완성되는 특성을 지니고 있다. 그러나 본 연구에서는 관객이 무용수의 움직임과 음악, 시각적 요소를 통해 어떤 경험을 하며 이러한 경험이 작품의 의미 형성에 어떻게 기여하는

지에 대한 분석이 부족하였다. 관객과 작품 간의 상호작용이 미디어 아트의 중요한 특성 중 하나라는 점을 고려할 때 관객의 경험과 역할에 대한 논의가 추가될 필요가 있다.

앞으로의 연구 방향은 디지털 기술과 인간 감각의 관계를 보다 심층적으로 탐구하고 이를 철학적이고 미학적인 논의와 결합하는 데 초점을 맞출 필요가 있다.

첫째, 디지털 기술이 인간 감각을 확장하고 심미적 경험을 풍부하게 하는 과정에서 어떤 역할을 하는지에 대한 질문을 중심으로 연구를 진행할 수 있다. 기술 철학자 <마르샬 맥루한>이 언급한 바와 같이 기술은 단순히 인간의 도구가 아니라 인간의 감각과 사고를 확장하는 연장선으로 작용한다. 본 연구에서 사용된 리본 신스와 같은 인터페이스가 단순히 데이터를 처리하는 장치가 아니라 인간의 감각을 새로운 방식으로 연결하고 확장하는 역할을 한다는 점을 탐구하는 것은 중요한 연구 주제가 될 것이다.

둘째, 본 연구에서 다룬 기술적 구현과 예술적 표현을 바탕으로 관객 경험의 주체성을 강화하는 방식으로 미디어 아트를 발전시킬 수 있다. 관객이 작품에 단순히 반응하는 수동적 존재가 아니라 작품과 함께 의미를 만들어가는 능동적 주체로서의 역할을 탐구하는 연구는 미디어 아트의 새로운 가능성을 열어줄 수 있다. 관객의 움직임, 소리, 감정 등을 작품에 실시간으로 반영하는 방식으로 작품을 확장함으로써 관객의 경험을 더욱 심화할 수 있을 것이다.

셋째, 예술적 창작에서 기술적 변환이 미학적 가치 창출로 이어지는 과정을 심도 있게 분석할 필요가 있다. 예술가 <로이 아스콧>이 강조했듯이 디지털 아트는 변환(transformation)의 예술이다. 본 연구에서 리본신스와 Max/MSP, 터치디자이너를 통해 이루어진 변환 과정을 예술적 변환의 맥락에서 재해석하고 이를 통해 창출된 심미적 가치를 분석하는 것은 미디어 아트 연구에서 중요한 기여를 할 수 있다.

결론적으로 본 논문은 디지털 기술과 인간 감각의 접점을 탐구하며 미디어 아트 창작에서 기술과 예술의 융합이 가지는 가능성을 제시하였다. 그러나 기술적 구현을 넘어 예술적 표현과 철학적 성찰을 아우르는 종합적 접근이 필요하다. 앞으로의 연구는 기술과 인간 감각 그리고 예술적 상상력의 관계를 심층적으로 탐구하며 디지털 기술이 단순한 도구를 넘어 인간 경험을 확장하고 재구성하는 매개체로 작용할 수 있는 가능성을 탐구하는 데 초점을 맞춰야 할 것이다. 작품 <Splinters of Light: 빛의 파편>은 기술, 예술, 감각이 결합된 창의적 시도로 이러한 연구 방향의 출발점이 될 수 있다.

Keyword(검색어)

컴퓨터음악(computer music), 인터랙티브 멀티미디어 음악(interactive multimedia music), 맥스(Max/MSP), 실시간 사운드 프로세싱(real-time sound processing), 터치디자이너(TouchDesigner), 소리합성법(sound synthesis), 아두이노(아두이노), 피지컬컴퓨팅(physical computing)

E-mail: quixotic.bang@gmail.com

참 고 문 헌

1. 단행본, 학술지

마르샬 맥루한 (Marshall McLuhan), 「미디어의 이해: 인간의 확장」 (민음사, 2004)

오희숙, 「음악 속의 철학」 (심설당, 2009)

Alessandro Cipriani, & Maurizio Giri 「Electronic Music and Sound Design」
(Contemponet, 2013)

Charles Dodge, Thomas A. Jerse 「Computer Music: synthesis, composition and performance, Second Edition」 (Schirmer Books, 1997)

Miranda, Eduardo R., and Marcelo M. Wanderley, 「New Digital Musical Instruments: Control and Interaction Beyond the Keyboard」 (A-R Editions, 2006)

Andy Farnell 「Designing Sound」 (The MIT Press, 2010)

Scot Fitzgerald & Michael Shiloh, 「Arduino Project Book」 (Arduino AG, 2012)

Tom Igoe, 「Making Things Talk: Using Sensors, Networks, and Arduino to See, Hear, and Feel Your World」 (O'Reilly Media, 2007)

V.J Manzo, Will Kuhn 「Interactive Composition: Strategies using Ableton Live and Max for Live」 (Oxford University Press, 2015)

Miller Puckette, 「The Theory and Thechnique of Electronic Music」
(*World Scientific Publishing Company, 2006*)

Curtis Roads, 「The Computer Music Tutorial」 (*Massachusetts Institute of
Technology, 2023*)

Robert Rowe, 「Interactive Music Systems」 (*Massachusetts Institute of
Technology, 1993*)

Paul Scherz & Simon Monk, 「Practical Electronics for Inventors」 (*McGraw-
Hill Education, 2000*)

Daniel Shiffman 「The Nature of Code」 (*Daniel Shiffman, 2012*)

Tamara Smyth, 「Modulation」 (*Depart of Music, University of California,
San Diego, 2019*)

Rick Snoman 「Dance music manual」 (*Focal Press, 2014*)

Carol Vernallis & Amy Herzog & John Richardson, 「The Oxford Handbook of
Sound and Image in Digital Media」 (*Oxford University Press, 2013*)

2. 참고 논문

김진웅, 「줄타기를 이용한 인터랙티브 멀티미디어 시스템 제작 연구 (멀티미디어음악 작품 <Bassline>을 중심으로)」

(동국대학교 영상대학원 멀티미디어학과, 2015)

이동규, 「Interface를 이용한 인터랙티브 콘텐츠 연구」

(동국대학교 영상대학원 멀티미디어학과, 2010)

이현아, 「인터페이스를 이용한 멀티미디어음악 제작 연구」

(동국대학교 영상대학원 멀티미디어학과, 2010)

3. 웹사이트

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

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

Arduino: <https://Arduino.cc/>

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

ABSTRACT

Designing and Performing Interactive Electronic Musical Instruments Using Membrane Potentiometers and Pressure Sensors

-Focus on Multimedia Art <Splinters of Light>-

KIM, YOCHAN

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

This study presents a new form of performance that integrates a ribbon-based synthesizer (ribbon synth) constructed with a thin and flexible polyester film coated with resistive material, tape music, and visual elements, combining music, dance, and media art. The research

aims to explore the physical or software pathways enabling interaction between digital interface users and digital systems, while investigating the nonlinear characteristics of human perception. It seeks to propose new possibilities for digital technologies in contemporary media art and music creation through the production and performance of such works.

The study utilizes a custom-built ribbon synthesizer instrument featuring a SoftPot membrane potentiometer and force-sensitive resistors (FSR) to control synthesizer parameters in real time based on the performer's touch and pressure. Input data from these sensors is processed through an Arduino microcontroller and transmitted to Max/MSP, a visual programming language and development environment by Cycling '74. This system enables dynamic manipulation of various sound parameters such as pitch, filter, reverb, and amplitude, resulting in a unique and immersive tape music composition. These auditory elements are further expanded visually using TouchDesigner, a node-based visual programming software, which synchronizes visual effects with music and movement. Visual elements, including dynamic lines and trails, respond to the dancer's movements, creating a multisensory and interactive media art performance for the audience.

Another goal of this research is to analyze the linear and nonlinear characteristics of human perception and explore how they can be reflected in digital interfaces. Traditional digital instruments and interfaces typically rely on linear data processing, which may not align with

the nonlinear responses of human perception, potentially reducing sensory immersion. For example, data output from pressure sensors is generally linear, but humans perceive changes in pressure intensity in a nonlinear manner, often logarithmic. To address this discrepancy, this study employs a method where sensor data is converted into logarithmic scales using Arduino and transmitted to Max/MSP. This allows performers to achieve more intuitive and precise musical expressions.

The intention of this work is to explore new intersections between digital technology and human perception through performances that organically combine musical and visual elements. As suggested by the title, *Splinters of Light*, the music and visuals interact like fragmented pieces to create a holistic experience. Ribbon synth performances not only generate musical data but also produce visual data simultaneously, offering a new form of performance art that interacts with the audience in real time.

부록 : 첨부 DVD 설명

1. Splinters of Light: 빛의 파편_공연 영상

2024년 11월 9일 멀티미디어 작품 <Splinters of Light: 빛의 파편>

2. Splinters of Light: 빛의 파편_자료

작품에 사용된 Max/MSP, TouchDesigner, Arduino 자료

