



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

플루트의 실시간 사운드 프로세싱을 활용한
인터랙티브 멀티미디어 작품 연구
(멀티미디어 작품 <ATTUNE>을 중심으로)

지도교수 김 준

동국대학교 영상대학원
멀티미디어학과 컴퓨터음악전공
이 은 화

2022

석사학위논문

플루트의 실시간 사운드 프로세싱을 활용한
인터랙티브 멀티미디어 작품 연구
(멀티미디어 작품 <ATTUNE>을 중심으로)

이 은 화

지도교수 김 준

이 논문을 석사학위 논문으로 제출함
2021년 12월

이은화의 음악석사(컴퓨터음악)학위 논문을 인준함
2022년 1월

위원장 김정호

위원 정진현

위원 김 준



동국대학교 영상대학원

목 차

I. 서론	1
1. 연구 배경	1
2. 선행 연구	3
1) 플루트의 특징	3
2) 작품 <Bamboo Forest>	4
3) 사운드 인터랙티브 워크샵 <PLAY>	5
II. 기술 연구	8
1. 사운드 시스템 연구	8
1) Sampling을 이용한 Granular Synthesis	9
2) FFT 분석을 이용한 Phase Vocoder	14
① FFT(Fast Fourier Transform) 분석	14
② pfft~를 이용한 Phase Vocoder	15
3) Pitch Tracking을 활용한 Cross Synthesis	18
① fiddle~을 이용한 Pitch Tracking	18
② FFT 분석을 활용한 Cross Synthesis	19
2. 영상 시스템 연구	22
1) 영상 시스템	22
2) TouchDesigner를 이용한 영상 제작	23
① 3D Line	23
② 3D Particle System	25
③ Luma Blur	27

3. 조명 시스템 연구	28
1) 조명 시스템	28
① 조명 하드웨어	29
② Ethernet을 통한 DMX 신호 전송	29
③ TouchDesigner를 활용한 조명 콘솔	31
4. 공연 시스템 연구	32
1) 공연 시스템	32
2) OSC 통신을 이용한 인터랙션 시스템	33
III. 연구 기술의 작품 적용	35
1. 작품 소개	35
2. 작품의 구성 및 기술 적용	37
1) 음악의 구성 및 기술 적용	37
2) 영상의 구성 및 기술 적용	40
3) 조명의 구성 및 기술 적용	43
4) 무대 구성	45
3. 연구 기술 적용의 예술적 효과	46
IV. 결 론	47
참 고 문 헌	49
ABSTRACT	51
부록-1 : 작품 <ATTUNE> 악보	53
부록-2 : 첨부 DVD 설명	57

표 목 차

<표-1> 빛의 방향에 따라 달라지는 퍼포먼스 표현 효과	7
<표-2> 플루트 연주의 특징별 사운드 프로세싱의 효과	8
<표-3> Particle SOP의 파라미터	25
<표-4> cross synthesis를 활용한 사운드	38
<표-5> 파트별 주요 플루트 주법과 사운드 프로세싱	39

그림 목 차

[그림-1] 작품 <Bamboo Forest>의 녹음 장면	4
[그림-2] 사운드 인터랙티브 워크샵 <PLAY>의 현장	6
[그림-3] 오리지널 사인파와 granular synthesis를 적용한 파형	9
[그림-4] record~를 이용한 sampling 패치	10
[그림-5] Gaussian window를 적용한 buffer	12
[그림-6] grain을 생성하는 granular synthesis 패치	12
[그림-7] poly~를 이용한 granular synthesis 패치	13
[그림-8] 푸리에 변환	14
[그림-9] phase vocoder 패치	15
[그림-10] time stretching을 위한 pfft~패치 내부	16
[그림-11] pitch shifting을 위한 pfft~ gadget 패치 내부	17
[그림-12] fiddle~ 패치	18
[그림-13] FFT 분석을 통한 cross synthesis	19
[그림-14] 실시간 연주와 FM합성음의 cross synthesis	20
[그림-15] 사운드 시스템 설계도	21

[그림-16] 영상 시스템	23
[그림-17] noise line을 만드는 TouchDesigner 패치	24
[그림-18] TouchDesigner로 구현한 line과 noise line	24
[그림-19] particle을 변형하는 TouchDesigner 패치	26
[그림-20] line particle과 circle particle	27
[그림-21] luma blur 효과의 변화	27
[그림-22] 조명 시스템	28
[그림-23] GrandMA2 콘솔 설정	30
[그림-24] 수동 IP 변경과 DMX Out CHOP 설정	31
[그림-25] 공연 시스템 설계도	32
[그림-26] OSC 통신을 위한 Max 패치	33
[그림-27] TouchDesigner의 OSC In CHOP	34
[그림-28] 작품 <ATTUNE>의 실제 공연 이미지	35
[그림-29] 플루트의 주법 별 파형과 grani의 파형	37
[그림-30] A파트의 영상 변화	40
[그림-31] B파트의 영상 변화	41
[그림-32] C파트의 영상 변화	41
[그림-33] A'파트의 영상 변화	42
[그림-34] MA 3D로 구현한 무대 조명 시뮬레이션	43
[그림-35] B파트의 조명 변화	44
[그림-36] 무대 구성	45

악 보 목 차

[악보-1] 플루트 음역대의 특징	3
--------------------------	---

I. 서론

1. 연구 배경

컴퓨터의 발달과 개인 PC의 보급 이후인 1980년대 중반부터 역사와 문화 그리고 예술의 새로운 발상의 중심에 컴퓨터가 존재했다. 컴퓨터와 함께 발전한 디지털 테크놀로지가 예술 연구의 중요한 분야로 자리매김함으로써 전통적 예술의 경계는 점점 모호해졌다. 컴퓨터 음악에서의 상호작용(interaction)¹⁾은 음악이나 연주 자체와 컴퓨터(혹은 소프트웨어)와의 관계에서 일어난다.²⁾ 하지만 과학 기술의 비약적 발전으로 음악은 청각적 경험에 그치지 않고 컴퓨터를 통하여 다른 미디어와의 상호작용으로 이어져 멀티미디어로 구현될 수 있다. 그것은 흔히 시각적 매체로 발전되며 프로젝션 매핑(projection mapping)³⁾, 홀로그램⁴⁾, LED(Light Emitting Diode)⁵⁾ 등 다양한 방식으로 표현된다. 이러한 상호작용은 예술가들이 사용할 수 있는 도구의 확장과 감상자가 느낄 수 있는 감각의 확대로 이어져 새로운 예술의 형태로 나타난다.

헤켈(Paul Heckel)과 넬슨(Ted Nelson)은 소프트웨어의 구상과 설계에서 가장 중요한 것이 ‘믿게 만드는 것’이라고 주장했다.⁶⁾ 감상자가 실제로 상호 작용이 일어나는 것을 목격하도록 몰입할 수 있는 경험을 디

1) 두 개 이상의 개체가 서로 영향을 미치는 일종의 동작이다.

2) George E. Lewis, Interactivity and Improvisation, :*The Oxford Handbook of Computer Music*, Oxford University Press, 2009, p. 457-466.

3) 대상물의 표면에 빛으로 이루어진 영상을 투사하여 변화를 줌으로써, 현실에 존재하는 대상이 다른 성격을 가진 것처럼 보이도록 하는 기술이다.

4) 홀로그래피 원리를 이용해 대상 물체의 3차원 입체상을 재현하는 매체이다.

5) 발광 다이오드로 반도체의 특성을 이용해 전기 신호를 빛으로 변환시킨다.

6) Brenda Laurel, *Computers as Theatre*, Addison-Wesley Professional, 2015, p. 35.

자인 하는 것이 예술가의 역할이다.

본 연구에서 다루어질 작품 <ATTUNE>은 실시간 연주를 시각화하여 보여주는(sound visualization) 멀티미디어 작품으로 관객이 몰입하여 감상할 수 있도록 청각과 시각의 상호작용에 중점을 두었다. 이 작품은 한 대의 플루트(flute) 연주와 악기의 특성을 보완하고 극대화하는 실시간 사운드 프로세싱(real-time sound processing)이 함께 진행된다. 그리고 이 사운드의 실시간 분석을 통하여 영상 매체와 조명으로 시각화가 이루어진다.



2. 선행 연구

1) 플루트의 특징

플루트는 관악기 중에서도 목관악기로 B3부터 D7까지 연주할 수 있는 높은 음역대를 가진 악기이다.[악보-1]

플루트는 단선율 악기로 오케스트라에서 주로 멜로디의 요소를 담당한다. 음역대에 따라 표현할 수 있는 음색이 제한적이기에 작품의 제작 과정에서 반드시 고려해야 한다.



[악보-1] 플루트 음역대의 특징⁷⁾

플루트는 레가토(legato), 텅잉(tonguing)⁸⁾, 비브라토(vibrato)⁹⁾ 등의 전통적인 주법부터 플러터 텅잉(flutter tonguing)¹⁰⁾, 하모닉스(harmonics)¹¹⁾와 같은 특수한 주법까지 있다. 레가토는 한 호흡으로

7) Samuel Adler, *The Study of Orchestration*, W. W. Norton & Company, 1982, p. 180-181.

8) 윗니의 뒤쪽에 혀를 내어 호흡을 멈추고 혀를 재빨리 떼어 뒤로 당기며 멈춰있던 입김이 흘러 소리를 내도록 연주하는 주법.

9) 입김을 불어넣는 힘의 강약의 재빠른 변화로 소리의 파동을 유도하는 주법.

10) 혀끝을 입천장에 대고 'rrr' 발음으로 빠르게 굴리거나 진동시켜서 음의 떨림을 만들어내는 주법.

11) 평소보다 세게 울려 불어서 옥타브 위의 소리를 내는 주법.

길게 이어서 연주하는 주법인 반면, 플러터 텅잉은 짧고 거친 소리를 표현할 수 있다. 특수 주법들은 기존 주법에서 음색의 변화를 줄 수 있어 음악 전체의 강약(dynamic) 조절에 도움을 준다.

주법에 따른 음량과 음정, 음색(timbre)의 차이로 감상자는 다양한 청각적 경험을 할 수 있으며 여기에 사운드 프로세싱을 적용하면 훨씬 더 다양한 조합으로 음향적 풍부함을 구현할 수 있다.

2) 작품 <Bamboo Forest>

선행 연구로 2020년 12월 플루트를 활용한 사운드 프로세싱 작품 <Bamboo Forest>를 제작했다.[그림-1]



[그림-1] 작품 <Bamboo Forest>의 녹음 장면

플루트는 연주자의 호흡으로 소리를 발생시키는 악기로 작은 떨림까지 연주의 일부가 되는 섬세한 표현을 할 수 있다. 그리고 저음역대와 고음역대를 민첩하게 넘나들 수 있지만 한 번에 두 가지 이상의 음을 내기 어렵다. 따라서 음향적 풍부함을 구현하기 위해 Max¹²⁾로 실시간 사운드 프로세싱 효과를 만들었다. 저음역대와 배음이 부족한 악기의 특성을 보완하는 효과를 만들고, 배음이 풍부하게 들릴 수 있도록 딜레이(delay)¹³⁾와 리버브(reverb)¹⁴⁾ 효과를 사용하였다. 이를 통해 사람의 숨소리로 표현할 수 있는 섬세함과 사운드 프로세싱을 통한 음향적 풍부함을 얻을 수 있었다.

하지만 이 선행 연구를 통해 플루트에 없는 사운드를 보완할 수는 있었으나 두 사운드가 조화를 이루지 못했다는 점을 발견했다. 그 이유는 플루트에 대비되는 음색과 음고(pitch)로만 사운드 프로세싱을 구현함으로써 두 사운드가 하나의 화음(harmony)으로 인식되지 않고 분리되었기 때문이다. 따라서 플루트 연주를 실시간으로 분석하고 활용하여 조화를 이룰 수 있는 사운드 프로세싱이 필요했다.

3) 사운드 인터랙티브 워크숍 <PLAY>

조명과 사운드의 상호작용을 연구하기 위하여 2021년 9월 조명 시스템이 갖추어진 연희예술극장에서 사운드 인터랙티브 워크숍 <PLAY>를 진행하였다.[그림-2]

12) Cycling '74에서 개발한 인터랙티브 미디어를 구현하기 위한 소프트웨어이다. 데이터의 연산과 처리 및 프로그래밍이 가능한 Max와 음향 시그널 데이터 처리가 가능한 MSP, 그리고 real-time video 및 2D/3D 그래픽을 다루는 Jitter로 나누어져 있다.

13) 입력된 사운드를 일정 시간 지연시켜서 재생하는 사운드 프로세싱 효과이다.

14) 입력된 사운드가 실제 공간 안에 있는 것과 같은 반사음을 만드는 사운드 프로세싱 효과이다.



[그림-2] 사운드 인터랙티브 워크숍 <PLAY>의 현장

이 워크숍을 통해 음악에 조명이 반응하여 작동하는 과정을 실험하고 구현하였다. 10대의 LED조명과 GrandMA2¹⁵⁾ command wing 콘솔을 사용했고 음악을 재생하여 실시간으로 리듬·강약 등의 데이터로 조명의 색상과 조도(intensity)를 제어하도록 구현했다. 이 선행 연구를 통한 대의 컴퓨터로 음악과 조명을 동시에 제어하는 시스템을 구현할 수 있었다. 여기에 음악의 리듬과 조명의 on/off 타이밍을 일치시킴으로써 공간 전체를 활용한 사운드의 시각화(sound visualization)를 구현할 수 있었다. 이를 통해 음악이 무대 조명과 상호작용을 이룰 때 감상자의 몰입을 극대화 할 수 있다는 결과를 도출했다.

15) 독일의 MA Lighting에서 만든 조명 콘솔이다. 공연용 조명 콘솔의 표준으로 command wing 버전은 휴대성과 간편성을 높였다.

하지만 일반 LED조명의 경우 실시간으로 조명기의 각도를 움직이기 어렵다는 한계가 있다. 한 번에 하나의 공연만 하는 것이 아니라 연속적인 다양한 퍼포먼스를 위해 팬(pan)과 틸트(tilt)값 조절이 가능한 무빙라이트(moving light)가 필요하다. 또한 실시간 사운드 프로세싱을 위해 연주자가 무대 위에 올라갈 때 조명의 각도는 매우 중요한 역할을 한다. <표-1>은 빛의 방향에 따라 퍼포먼스를 표현하는 효과가 어떻게 달라지는지를 보여준다. 연주자를 비추는 조명이 단순히 켜지고 꺼지는 것뿐만 아니라 빛의 방향에 따른 감각의 다양성을 이용하기 위해 조명기의 방향별로 다르게 조도를 조절할 수 있다.

<표-1> 빛의 방향에 따라 달라지는 퍼포먼스 표현 효과¹⁶⁾

빛의 방향	감각	감정
전광 상부	안정	건강
전광 옆 상부	안정	건강, 행동적
전광 하부	불안정	추악
정면 상부	불안정	어둡고 무표정
정면 옆	긴장	군셈
정면(수평)	안정	평온
측광	약간 긴장	인상적
후광	강한 긴장	감정적

선행 연구의 결과에 따라 본 논문의 작품 <ATTUNE>은 플루트 연주의 다양한 주법과 조화를 이루는 실시간 사운드 프로세싱을 목표로 음악을 제작하였으며, 여기에 공간 전체를 활용한 몰입감과 시각화를 위해 무대 조명과 영상 매체를 사용하여 멀티미디어 작품으로 구현했다.

16) 이장원, 「무대공연조명에서 빛과 색에 대한 연구」, 월간전기, 2009.

II. 기술 연구

1. 사운드 시스템 연구

본 연구에서는 크게 세 가지 목적으로 사운드 프로세싱을 만들었다. 첫 번째, 플루트의 부족한 배음을 보완하고자 sampling¹⁷⁾ 기법을 사용하여 granular synthesis¹⁸⁾ 효과를 만들었다. 두 번째, 플루트의 맑고 경쾌한 음색과 어울리는 사운드를 만들기 위해 phase vocoder¹⁹⁾를 사용하여 플루트보다 높은 음역대의 민첩한 사운드를 만들었다. 이를 통해 어쿠스틱 사운드와 컴퓨터 프로세싱 사운드와의 조화를 이루고자 했다. 마지막으로 cross synthesis²⁰⁾ 효과를 사용하여 플루트로 연주할 수 없는 종소리, 일렉트릭 기타와 같은 사운드를 만들어 음악 전체의 강약(dynamic)을 형성하고자 하였다.

<표-2> 플루트 연주의 특징별 사운드 프로세싱의 효과

플루트 연주	사운드 프로세싱	목 적	효 과
단선율 악기 B3 ~ D7 음역대	granular synthesis	악기의 한계 보완	저음역대(최대 B1까지) 보완 부족한 배음 구조의 보완
맑고 경쾌한 음색	phase vocoder	음색의 조화	높은 음역대 · 빠른 재생속도의 민첩한 사운드 구현
다양한 주법	cross synthesis	새로운 사운드 구현	일렉트릭 기타 음색 및 종소리와 같은 사운드 구현

17) 아날로그 형식으로 존재하는 자연음을 디지털 신호로 변환하는 과정이다.

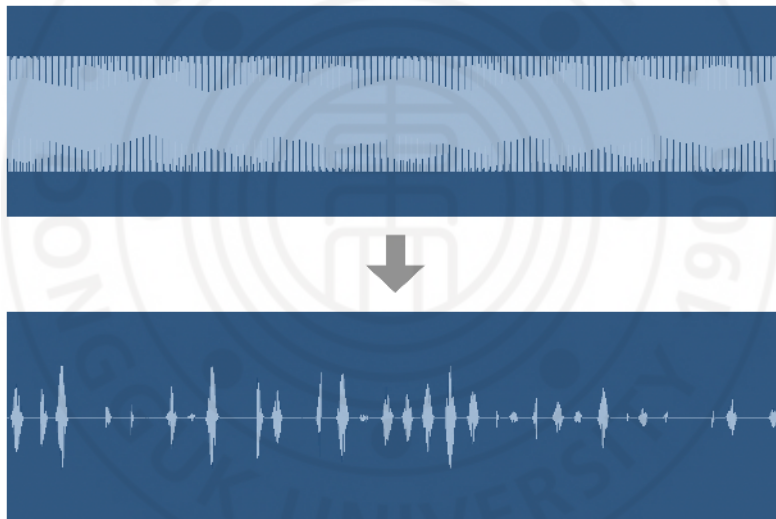
18) 사운드의 특정 구간을 잘게 쪼개어 재합성 하는 효과이다.

19) 위상(phase) 정보를 사용하여 푸리에 변환을 통해 음의 높낮이 또는 재생 속도를 변형시키는 소리 합성 방식을 말한다.

20) 두 개 이상의 오디오 신호를 합성하여 원본 음색의 특성을 가진 새로운 사운드를 만드는 합성 방식을 말한다.

1) Sampling을 이용한 Granular Synthesis

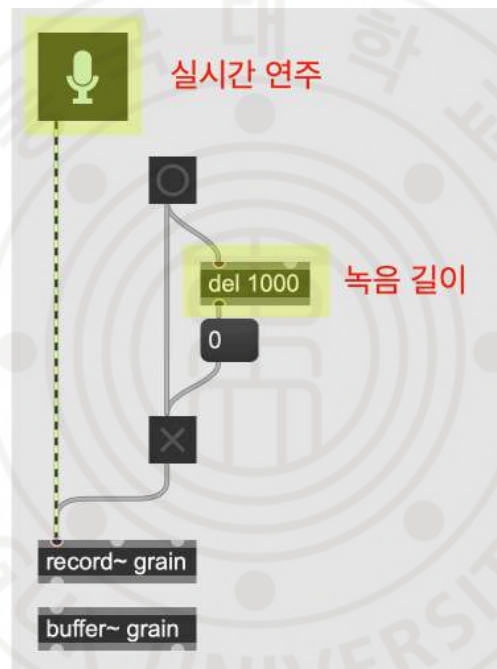
플루트는 단선율 악기로 명료하고 민첩한 악기의 특성을 가지고 있다. 하지만 화성적으로 풍부하거나 하나의 덩어리와 같은 묵직한 사운드를 만들어내기 어렵다. 이러한 악기의 특성을 보완하기 위해 granular synthesis 효과를 만들었다. granular는 곡식의 작은 낱알을 일컫는 ‘알갱이’라는 뜻의 ‘grain’에서 파생된 단어이다. ‘합성’이라는 뜻의 synthesis와 함께 쓰여 사운드의 특정 구간을 잘게 쪼개어서 재합성 하는 효과를 가리킨다.



[그림-3] 오리지널 사인파와 granular synthesis를 적용한 파형

[그림-3]은 440Hz의 사인파와 그 파형을 30ms 길이로 쪼개어 50ms 간격으로 재생하도록 만든 granular synthesis 효과를 적용한 파형이다. 이 효과를 사용하여 다양한 음고로 짧게 끊어지는 사운드뿐만 아니라 길게 지속되는 사운드도 만들 수 있다. 여기서 제어하는 수치(parameter)는 크게 6가지가 있다.

① 샘플(sound sample): Max를 통해 실시간으로 연주되고 있는 사운드가 녹음된다. 이 과정을 샘플링(sampling)이라고 한다. [그림-4]는 record~오브젝트를 사용하여 샘플링하는 패치이다. 본 패치는 1초(1000ms)동안 녹음하도록 설정되었다. 녹음된 사운드 샘플은 buffer~²¹⁾오브젝트를 통해 컴퓨터의 메모리에 저장된다. 결국 이 샘플이 잘게 쪼개어져 grain이 된다.



[그림-4] record~를 이용한 sampling 패치

② 시작점(start point): 녹음된 샘플에서 grain의 시작점을 어느 부분으로 할 것인지 정한다.

21) 컴퓨터 메모리에 사운드의 샘플을 저장할 수 있는 공간.

③ 길이(duration): grain의 길이를 설정할 수 있다. 그 길이는 샘플이 녹음된 길이(예: 1000ms)보다 길 수 없다. 보편적으로 20~50ms를 사용하지만 그 보다 길거나 짧은 길이도 사용할 수 있다.

④ 속도(playback rate): Max의 play~오브젝트를 이용하여 grain을 재생할 때 시작점, 끝나는 지점, 길이(duration)를 지정할 수 있다. 여기서 끝나는 지점을 변화시킴으로써(시작점 + 길이 * 속도) 재생 속도를 변화시킨다. 이 수치를 제어하여 grain의 음고(pitch)를 조절할 수 있다.

⑤ Envelope: grain을 재생할 때 click noise²²⁾를 피하기 위해 시작 지점과 끝 지점의 음량 값이 0이 되도록 하는 envelope²³⁾이 필요하다. 이 envelope을 만드는 수식을 window 함수라고 하며 실시간으로 사운드를 녹음하여 재생할 때 유용하다. 본 연구는 부드럽게 이어지는 소리를 만들기 위해, 완만한 곡선의 형태를 만드는 Gaussian window²⁴⁾를 사용했고 그 수식은 다음과 같다.

$$w[n] = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{n - N/2}{\sigma N/2}\right)^2\right), \quad 0 \leq n \leq N. \quad 25)$$

$$\sigma \leq 0.5$$

N은 buffer size²⁶⁾와 같기 때문에 Max의 I/O Vector Size로 적용된다. [그림-5]는 이 함수의 N=512, 표준편차 $\sigma=0.4$ 의 값을 Max의 buffer에 적용한 모습이다.

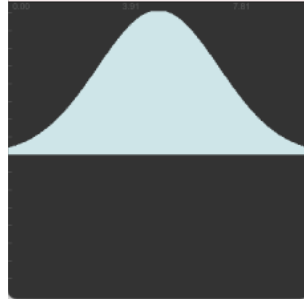
22) 시그널이 순간적으로 끊어지다가 이어질 때 나는 잡음.

23) amplitude envelope을 의미하며 시간에 따른 음량 값의 변화이다.

24) 종 모양의 형태를 가진 함수이다. 정규 분포라고도 하며 많은 자연 현상을 설명하는 데에 유용하다.

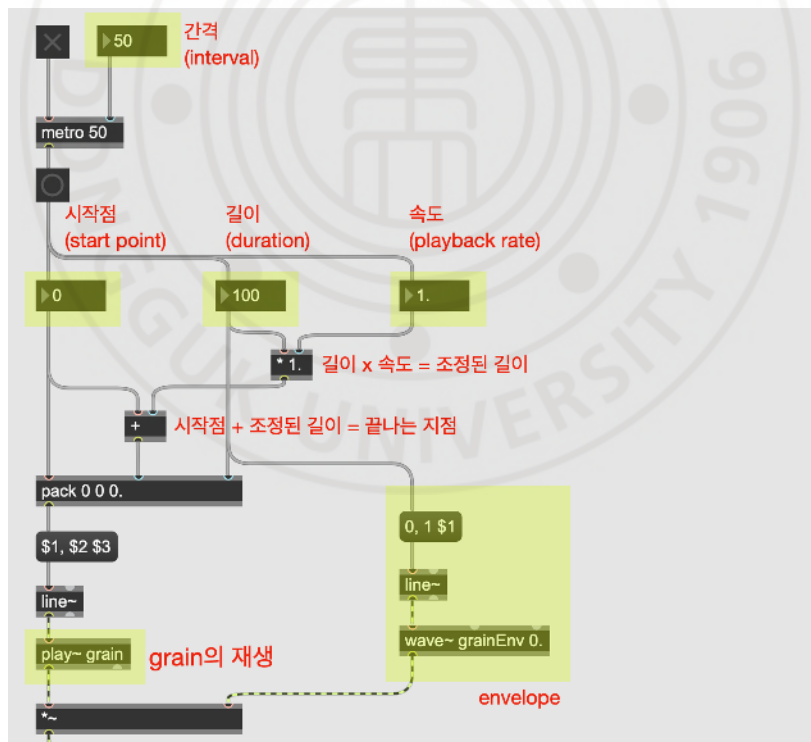
25) Julius O. Smith, *Spectral Audio Signal Processing*, W3K Publishing, 2011.

26) 컴퓨터로 입력 및 출력을 하기 위해 한 번에 처리되는 샘플의 양을 나타낸다.



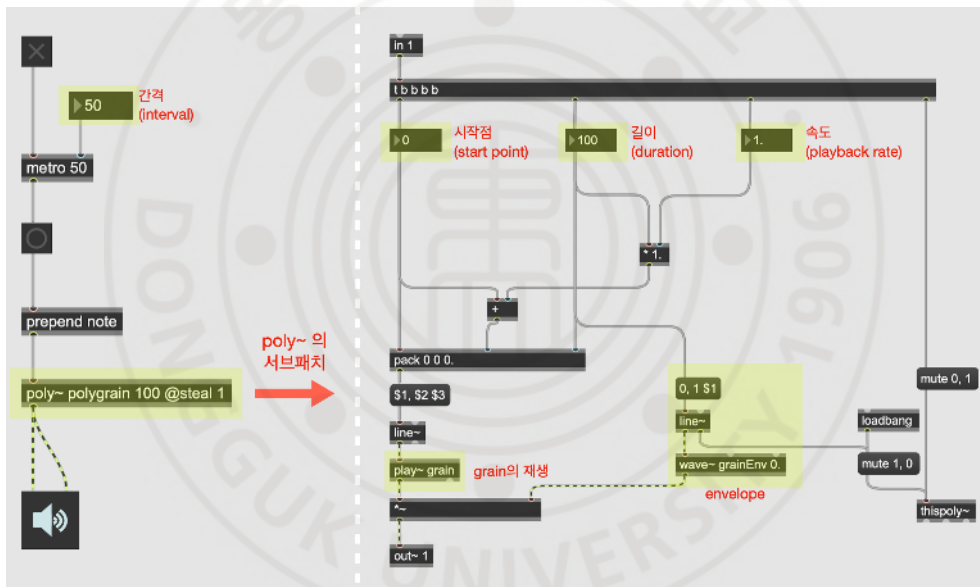
[그림-5] Gaussian window를 적용한 buffer

⑥ 간격(interval): metro오브젝트를 이용하여 일정한 시간(ms) 간격으로 grain을 재생하도록 지정한다. [그림-6]은 위의 6가지 수치를 적용한 granular synthesis의 패치이다.



[그림-6] grain을 생성하는 granular synthesis 패치

이러한 방식으로 샘플, 시작점, 길이, 속도, envelope, 간격을 이용한 granular synthesis를 만들 수 있다. 하지만 길이보다 간격이 짧을 경우에 먼저 생성되는 grain의 재생이 중단되고 그 다음 grain이 생성된다. 따라서 두 grain이 겹쳐지는(overlapping)효과를 위해 poly~오브젝트를 사용한다. poly~는 하나의 오브젝트로 여러 개의 동일한 서브패치를 만들고 관리할 수 있으므로 여러 개의 grain을 생성하고 재생시킬 수 있다. [그림-7]은 poly~를 사용한 granular synthesis패치와 poly~의 서브패치이다.



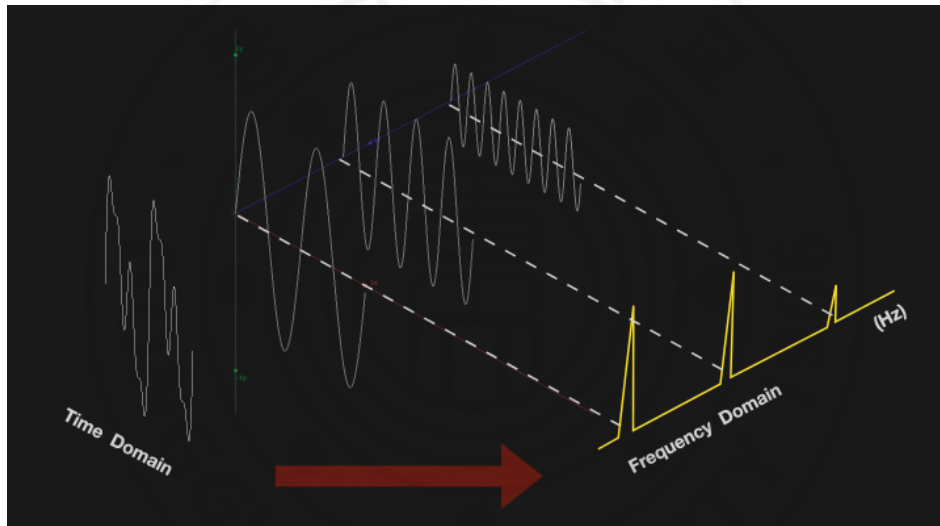
[그림-7] poly~를 이용한 granular synthesis 패치

본 연구에서는 poly~를 이용하여 각각의 수치를 다르게 조정하는 4개의 granular synthesis 효과를 만들었다. 각각 다른 속도와 간격, 길이로 grain을 생성하면 플루트의 부족한 배음을 채우고 저음역대의 사운드까지 구현할 수 있다.

2) FFT 분석을 이용한 Phase Vocoder

① FFT(Fast Fourier Transform) 분석

오디오 신호는 시간(time)에 따른 진폭의 지속적인 변화로 나타낼 수 있다. 푸리에 변환(Fourier transform)은 [그림-8]과 같이 연속적인 신호를 시간상의 영역(time domain)에서 주파수 영역(frequency domain)으로 변환함으로써 구성 주파수 분석의 기초가 된다.

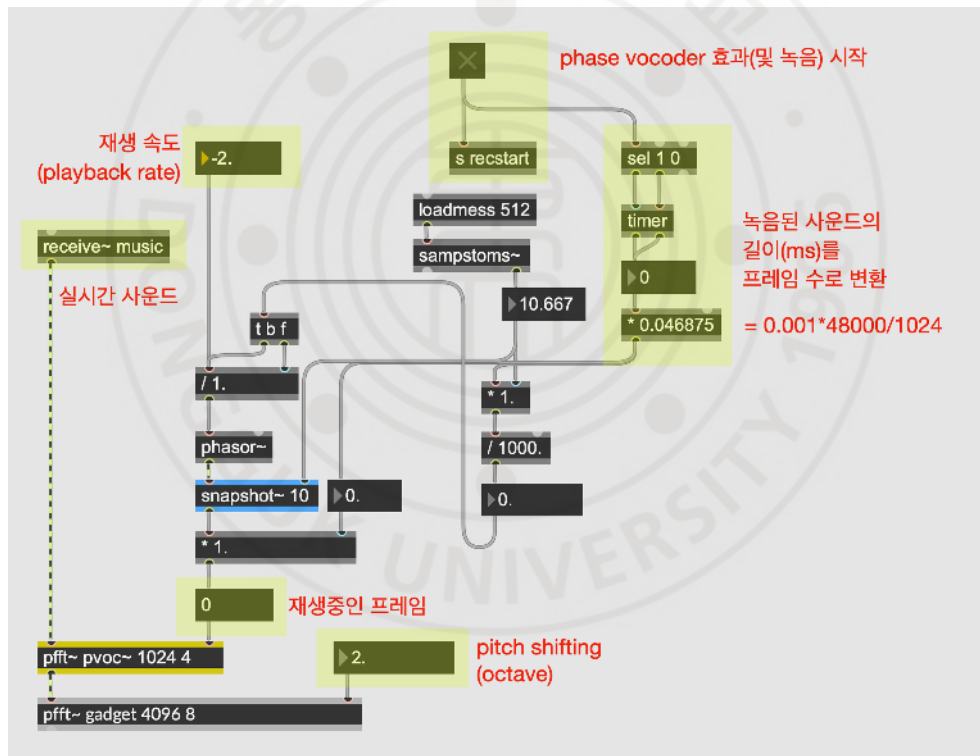


[그림-8] 푸리에 변환

FFT(Fast Fourier Transform) 분석은 디지털 오디오를 다룰 때 위의 푸리에 변환을 일정한 샘플 단위로 나누어 매우 빠른 속도로 처리하는 것을 말한다. 그리고 이 샘플 단위는 window 함수에 의해 나뉘지며 하나의 프레임이 된다.

② pfft~를 이용한 Phase Vocoder

phase vocoder는 사운드를 실시간으로 time stretching 하거나 pitch shifting 할 수 있는 효과이다. 일반적으로 time stretching으로 재생 시간이 늘어나면 주파수가 낮아져서 음정이 떨어지게 된다. 하지만 Max의 pfft~오브젝트를 사용한 phase vocoder는 여러 프레임을 겹쳐서 FFT분석을 할 수 있기 때문에 오차를 줄이고 원본 사운드의 음정 변화 없이 재생 속도를 조절할 수 있다. [그림-9]는 time stretching과 pitch shifting 효과를 동시에 주는 phase vocoder 패치이다.

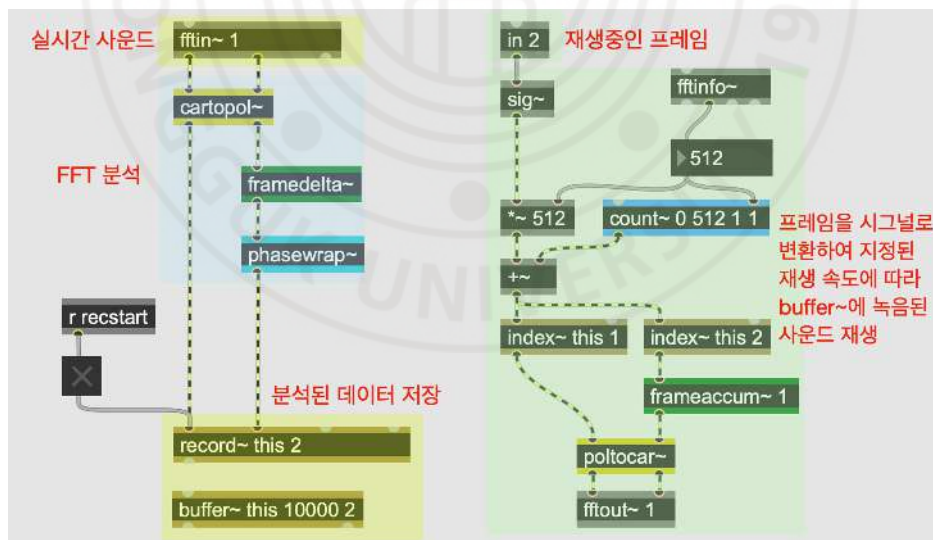


[그림-9] phase vocoder 패치

본 연구에서는 지정한 구간에서만 phase vocoder 효과가 일어나도록 하기 위해 timer오브젝트를 사용하여 샘플의 시작지점과 끝 지점 사이의 간격을 ms값으로 받았다. 그리고 이 값을 수식을 통해 FFT분석의 프레임 개수로 변환했다. Max에서 48000 sampling rate²⁷⁾를 사용하기 때문에 녹음된 길이(ms)에 0.001과 48000을 곱하면 녹음된 샘플의 개수를 구할 수 있다. 여기서 FFT 분석은 한 프레임 당 1024개의 샘플 단위로 처리하고 있으므로 그 값을 1024로 한 번 더 나눈다.

$$T(ms) * 0.001 * 48000 / 1024$$

따라서 이 수식에 의해 0.046875라는 값을 곱하여 녹음된 구간의 프레임 개수를 구한다. 그리고 이 프레임들은 지정된 속도(playback rate)로 재생된다. 1은 원래 속도이며 2는 두 배 빠른 속도로 재생되는 것을 의미한다. 여기에 음수를 입력하면 역으로 재생되는 효과를 얻을 수 있다. [그림-10]은 time stretching을 할 수 있도록 만든 pfft~ 패치 내부이다.

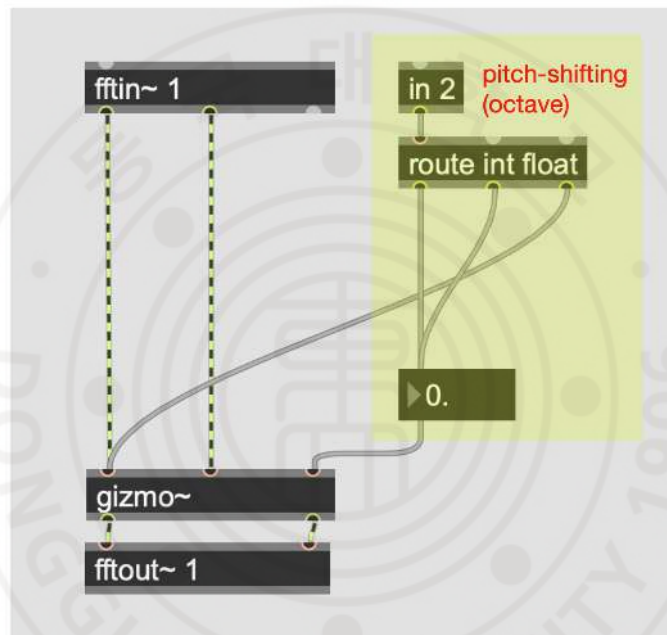


[그림-10] time stretching을 위한 pfft~ 패치 내부

27) 1초(1000ms)당 사용하는 표본(sample)의 개수.

실시간 사운드는 FFT 분석을 거쳐 record~를 통해 buffer~에 저장된다. 그리고 이 사운드는 index~오브젝트에 의해 지정된 속도에 따라 녹음된 사운드를 재생한다.

[그림-9]에서 볼 수 있듯이 pfft~ gadget의 오른쪽 inlet을 통해 pitch shifting이 이루어진다. 옥타브 단위로 쓸 수 있으며, 패치의 내부는 [그림-11]과 같다.



[그림-11] pitch shifting을 위한 pfft~ gadget 패치 내부

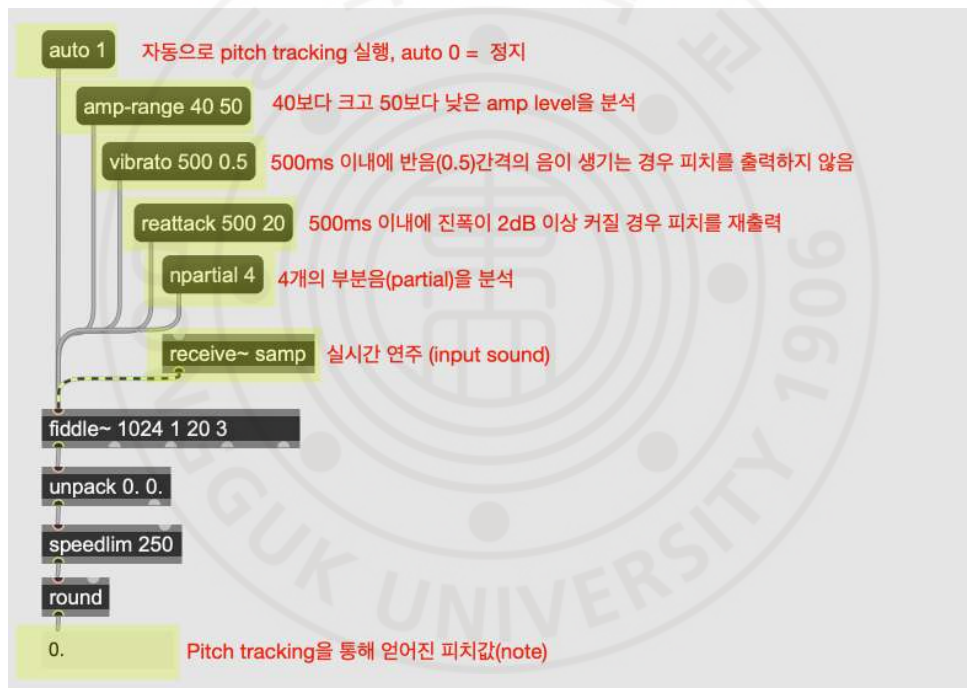
gizmo~는 푸리에 변환을 이용하여 진폭의 피크를 유지한 채 주파수 영역의 변화를 줌으로써 실시간 pitch shifting이 가능하도록 만들어진 오브젝트이다.²⁸⁾

28) Richard Dudas, 「Spectral Envelope Correction for Real-Time Transposition: Proposal of a "Floating-Formant" Method」, Proceedings of ICMC, 2002, p.126-129.

3) Pitch Tracking을 활용한 Cross Synthesis

① fiddle~을 이용한 Pitch Tracking

fiddle~오브젝트²⁹⁾는 주파수 스펙트럼 상에서 진폭이 높은 지점 (peak)을 분석하여 음고를 추적(tracking)한다.³⁰⁾ 또한 [그림-12]와 같이 여러 파라미터를 조절하여 사용할 수 있다. 플루트는 배음이 적은 단선울 악기이므로 pitch tracking을 통해 더욱 정확한 데이터를 얻을 수 있다.



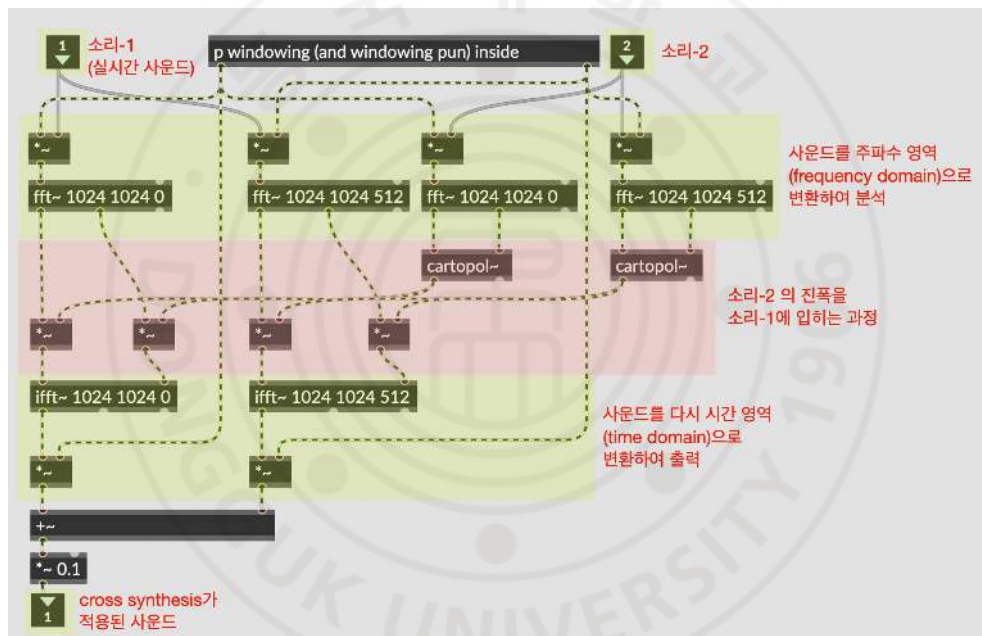
[그림-12] fiddle~ 패치

29) 실시간 연주의 pitch tracking을 위해 만들어진 Max 오브젝트로 San Diego 대학교의 Miller S. Puckette 교수가 개발하였다.

30) Miller S. Puckette, Theodore Apel, David D. Zicarelli, 「Real-time audio analysis tools for Pd and MSP」, Proceedings of ICMC 98, Ann Arbor, 1998.

② FFT 분석을 활용한 Cross Synthesis

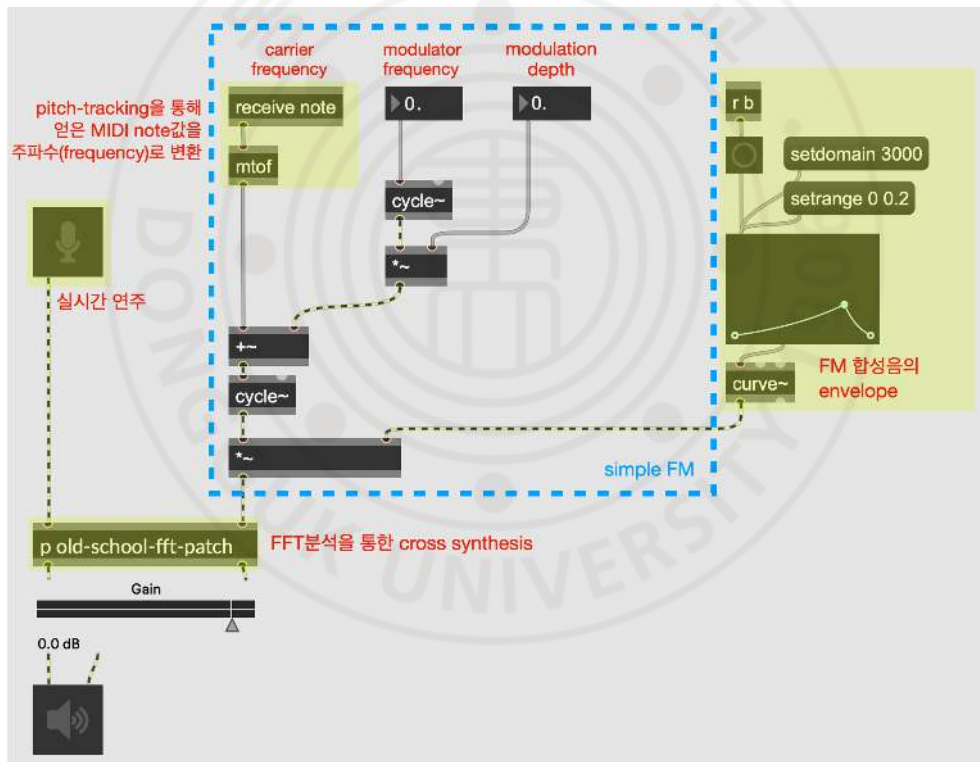
cross synthesis는 두 가지 소리를 합성하는 효과이다. 소리-1과 소리-2를 합성할 때 FFT 분석에 의해 진폭 값이 더 큰 주파수는 서로 강화되고, 진폭 값이 약한 주파수는 감쇄된다. 이 효과는 음색과 envelope이 서로 다른 사운드를 합성하면 훨씬 더 새로운 사운드를 얻을 수 있다. [그림-13]은 FFT 분석의 과정을 통해 소리-2의 진폭을 소리-1에 적용하는 과정을 보여준다.



[그림-13] FFT 분석을 통한 cross synthesis

본 연구에서는 플루트의 실시간 연주(소리-1)와 FM합성³¹⁾(소리-2)을 사용했다.

[그림-14]는 기본적인 FM합성음과 실시간 연주의 cross synthesis 패치이다. FM합성음의 carrier frequency에 pitch tracking을 통해 얻은 주파수 값을 사용하였고 음고가 변화할 때마다 FM합성음의 envelope이 작동하도록 설계했다. 따라서 플루트 연주에 맞추어 같은 음고로 배음이 풍부한 사운드가 설정한 envelope의 형태로 발생하여, 연주의 흐름을 해치지 않는 새로운 사운드를 구현할 수 있다.

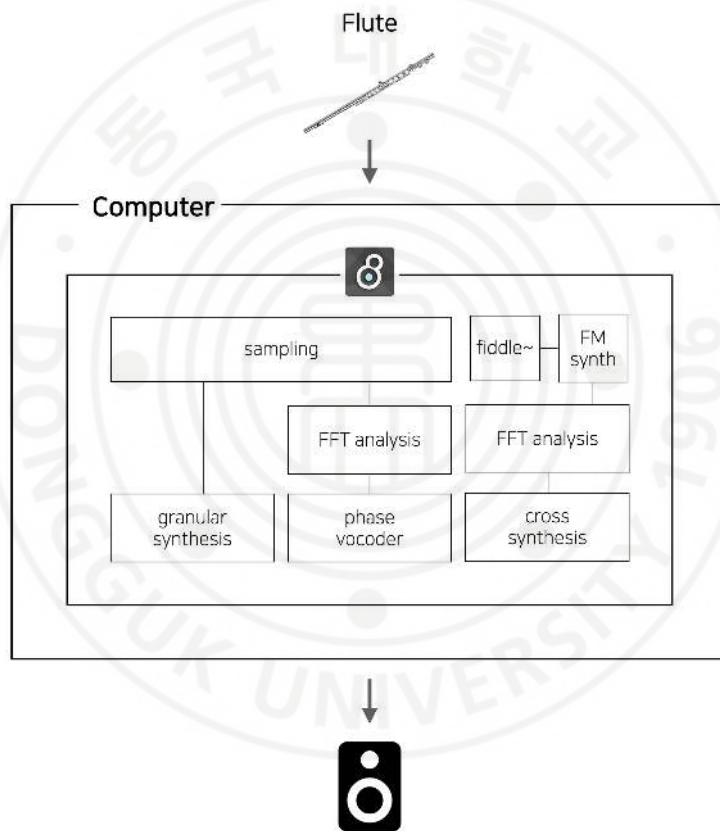


[그림-14] 실시간 연주와 FM합성음의 cross synthesis

31) 주파수 변조 합성법 (frequency modulation synthesis)으로 기준 주파수에 변형 주파수를 입력하여 배음이 풍부한 변조된 파형을 얻을 수 있다.

위의 효과들을 플루트의 연주에 적용하여 만든 실시간 사운드 프로세싱 시스템은 [그림-15]와 같다.

플루트 연주는 실시간으로 마이크를 통해 컴퓨터로 전송된다. 전송된 사운드는 Max에서 실시간 프로세싱에 의해 다양한 사운드로 구현되고 이것이 음향 콘솔을 거쳐 스피커로 출력된다.



[그림-15] 사운드 시스템 설계도

2. 영상 시스템 연구

1) 영상 시스템

본 연구에서는 모든 비주얼(영상 매체)을 TouchDesigner³²⁾를 이용하여 만들었다. 이 소프트웨어는 자체적으로 그래픽을 만들 수 있을 뿐만 아니라 OSC³³⁾와 DMX³⁴⁾ 등 여러 가지 신호를 주고받을 수 있기 때문에 다양한 미디어를 동시에 사용할 때 매우 편리하다.

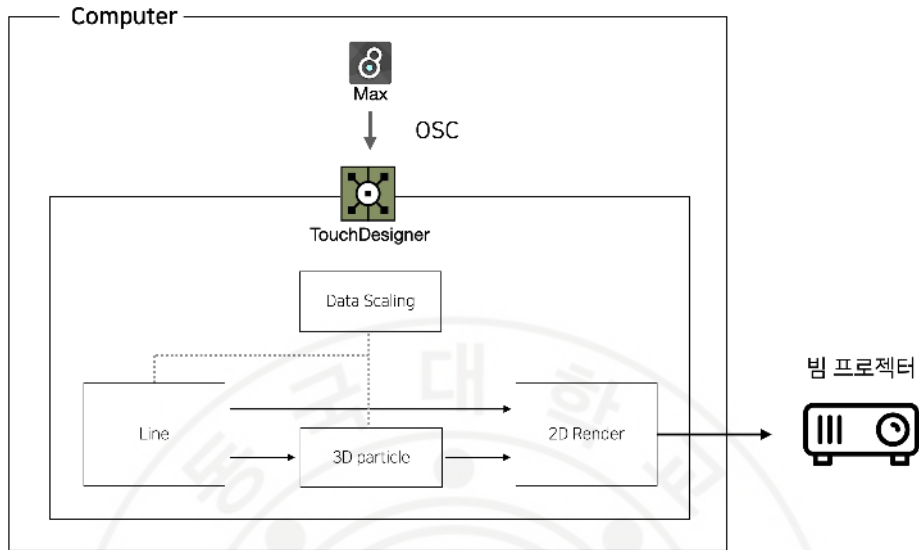
본 연구는 OSC 신호를 기반으로 Max에서 TouchDesigner로 데이터를 보내도록 설계했다. 이때 사용된 사운드의 데이터는 대표적으로 플루트 연주의 음고(pitch), 사운드 프로세싱의 음량 값(amplitude level), 그리고 특정 주파수의 음량 값이다. TouchDesigner의 CHOP³⁵⁾ reference 개념은 OSC 통신으로 전송한 사운드의 데이터를 비주얼의 생성 과정에 필요한 파라미터가 참조할 수 있도록 한다. 따라서 사운드에서 얻은 데이터를 비주얼이 생성되는 각각의 단계에 매핑(mapping)할 수 있다. 이러한 시스템을 통해 실시간으로 음악에 반응하는 영상이 구현되고, 최종적으로 프로젝터를 통해 출력된다. [그림-16]은 영상 시스템을 도식화한 것이다.

32) Derivative에서 만든 실시간 인터랙티브 멀티미디어를 위한 비주얼 프로그래밍 소프트웨어.

33) Open Sound Control의 약자로 사운드 데이터 전송을 위한 네트워크 통신 규약이다.

34) Digital MultipleX의 약자로 무대 조명과 특수효과를 제어하는 디지털 통신 네트워크의 표준이다.

35) CHOP(Channel Operator): 모션, 오디오, 키프레임, 하드웨어의 입력과 DMX, MIDI, OSC를 포함한 모든 데이터 스트림(Data Stream)의 입력을 처리하고 출력할 수 있는 오퍼레이터.



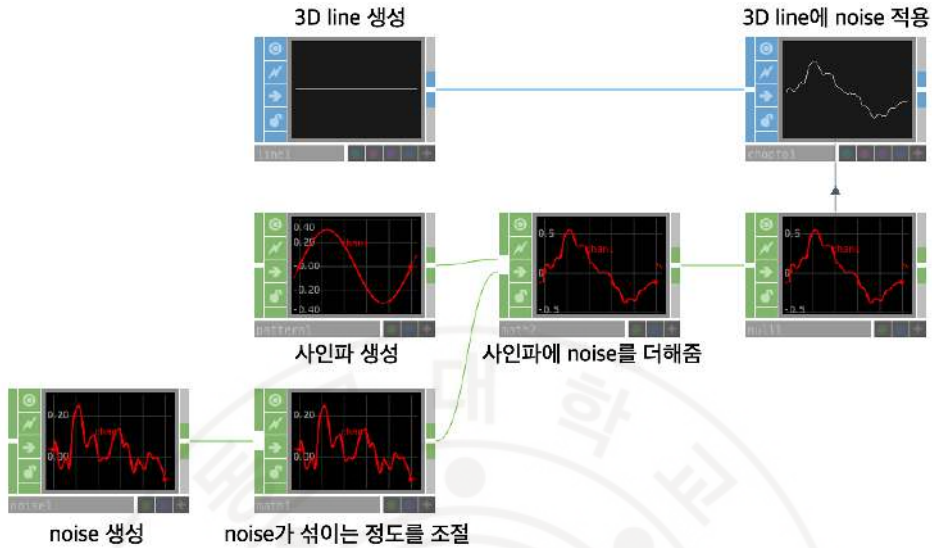
[그림-16] 영상 시스템

2) TouchDesigner를 이용한 영상 제작

① 3D Line

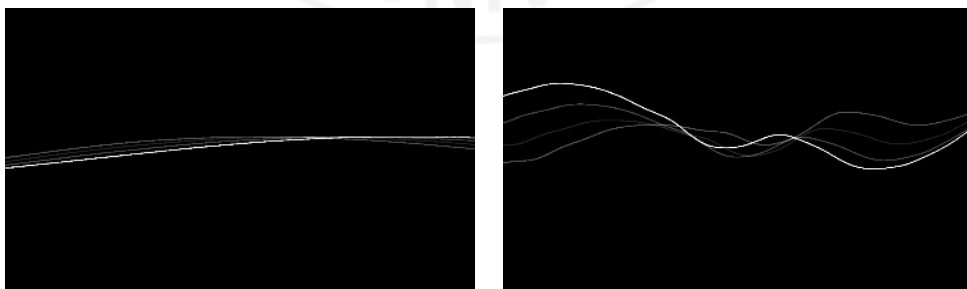
TouchDesigner에서 Line SOP³⁶⁾을 이용하면 3차원의 공간에 점(point)으로 이루어진 선을 만들 수 있다. 여기에 Pattern CHOP을 사용하여 점과 같은 수의 샘플(sample)로 파형을 만들고 line의 position y값에 매핑하면 각 점의 y좌표를 바꿀 수 있다. 본 연구에서는 부드럽게 연주되는 플루트의 사운드를 시각화 하기위해 사인파를 이용했다. 그리고 이 사인파의 amplitude에 OSC를 통해 받은 플루트 연주의 음고값을 매핑했다. 따라서 이후의 모든 영상의 소스가 되는 line의 움직임이 플루트 연주에 의해 변화하는 시스템을 구축하였다.

36) SOP(Surface Operator): 3D 작업을 위해 사용하는 오퍼레이터. 기하학, 파티클 시스템, 모델링 등에 사용된다.



[그림-17] noise line을 만드는 TouchDesigner 패치

그리고 이 line에 또 다른 변형을 가하기 위해 noise를 적용했다. [그림-17]과 같이 noise를 생성한 후 이것을 사인파와 더하여 3D line의 y좌표에 적용하였다. 여기서 Math CHOP의 multiply 수치에 플루트 사운드의 음량 값을 매핑하여 noise가 섞이는 정도를 조절했다. 따라서 플루트가 높은 음역대를 강하게 연주할수록 line의 움직임이 커지고 noise가 섞여 일그러지는 형태가 된다. [그림-18]은 플루트 연주의 음고와 음량 값에 따른 line의 변화이다.



[그림-18] TouchDesigner로 구현한 line과 noise line

② 3D Particle System

particle system은 비와 눈, 불꽃과 같은 자연 현상을 만드는 데에 자주 사용된다. 입자의 성질과 그에 가해지는 힘을 변형함으로써, 플루트 연주가 사운드 프로세싱에 의해 잘게 쪼개어지고 변형되는 효과를 시각화 하였다.

본 연구에서는 TouchDesigner의 Particle SOP을 이용하여 3D로 입자의 동작을 생성하고 제어하였다.<표-3>

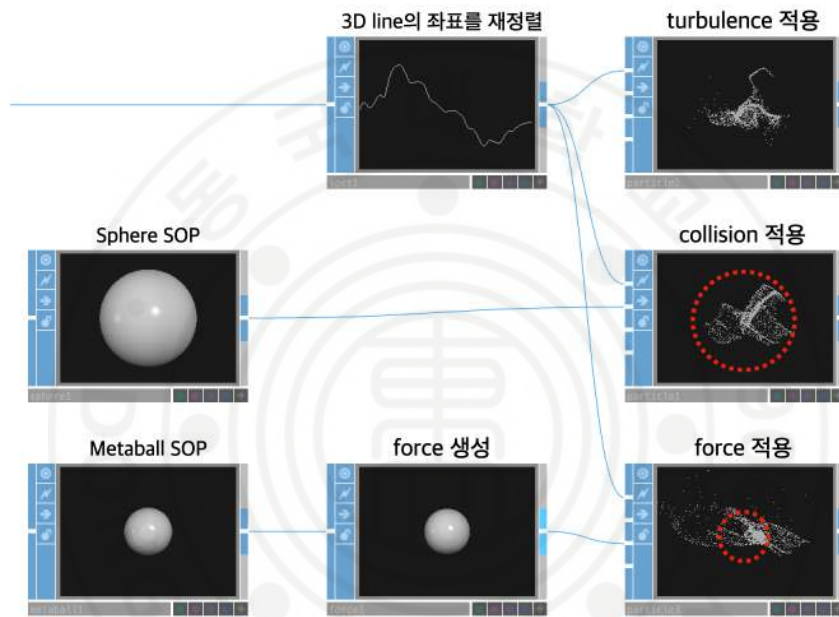
<표-3> Particle SOP의 파라미터

Force	External Force	x, y, z 각 축을 기준으로 입자에 작용하는 중력의 힘
	Wind	x, y, z 각 축을 기준으로 입자에 작용하는 바람의 힘
	Turbulence	x, y, z 각 축에 따른 난류의 힘
	Turn Period	난류가 작용하는 주기. 작을수록 작용 범위가 작고 클수록 큰 움직임
Particles	Drag	파티클이 서로 끌어당기는 성질
	Birth	생성할 파티클 수
	Life Expect	파티클의 수명

Particle SOP에서 적용할 수 있는 힘의 작용 외에도 force와 collision 소스를 추가하여 입자의 움직임을 변화시킬 수 있다. [그림-19]에서 Sort SOP은 3차원 상에서 점의 좌표를 재정렬 할 수 있는 오퍼레이터이다. 이를 통해 입자의 좌표를 Random 방식으로 재정렬하면 더 자연스러운 움직임이 구현된다.

Particle SOP의 input1에 collision 소스를 넣으면 입자가 해당 물체에 닿았을 때 충돌하는 효과를 만들 수 있다. 따라서 여기에 구(sphere)

를 적용하면 입자들이 구 안에 갇힌 채 움직이는 효과를 얻을 수 있다. 그리고 input2에는 입자에 작용하는 힘(force)을 별도로 넣을 수 있다. Metaball SOP은 힘의 장(force field)을 만드는 오퍼레이터로 반지름과 중심점을 설정해주어 힘이 모이는 위치를 지정할 수 있다. 이것이 적용된 입자들은 가운데로 모여 있는 것을 확인할 수 있다.



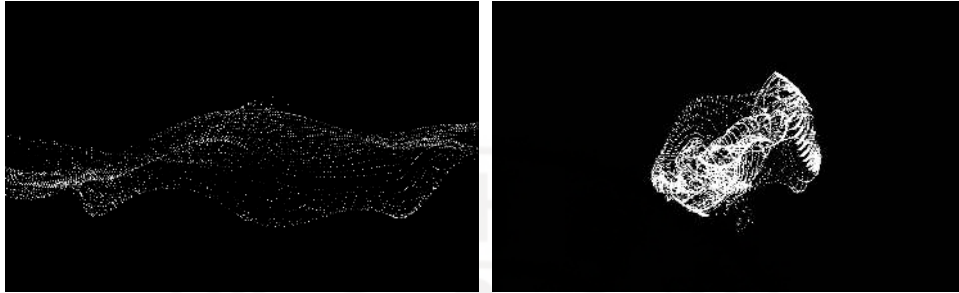
[그림-19] particle을 변형하는 TouchDesigner 패치

Force SOP의 값이 커질 때 metaball 부근으로 입자가 모이고, 작아질 때 입자가 퍼지게 된다. 이때 collision을 동시에 적용하면 [그림-20]의 왼쪽 이미지와 같이 구 안에 갇힌 모양으로 퍼진다. LFO³⁷⁾ CHOP을 이용하여 force값이 지속적으로 0(최소)과 1(최대)사이로 움직이게 하였고, 여기에 사운드 프로세싱의 음량 값을 곱하여 힘의 작용

37) Low Frequency Oscillator의 줄임말로 낮은 주파수 신호를 발생시키는 발진기를 가리킨다.

이 사운드에 의해 더 크게 변화하도록 구현하였다.

[그림-20]은 TouchDesigner로 구현한 line particle과 collision, force 소스를 추가하여 만든 circle particle이다.

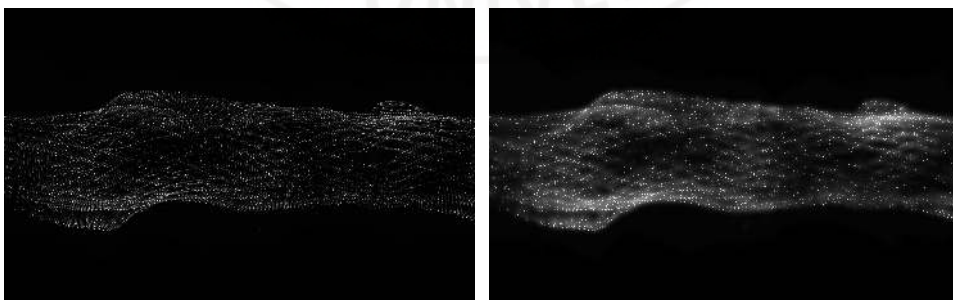


[그림-20] line particle과 circle particle

③ Luma Blur

TouchDesigner의 Luma blur TOP은 input1의 밝기(luminance) 값에 따라 픽셀 단위로 input0을 흐리게 만든다. 여기서 input0에는 기존 입자에 일반적인 blur 효과를 적용한 소스를 넣고, input1에 기존 입자를 그대로 넣으면 입자의 중심에서 가장자리로 갈수록 더 흐려지고 어두워지는 효과가 적용되어 빛이 번지는 이미지를 생성할 수 있다.

[그림-21]과 같이 이 효과는 사운드 프로세싱의 고음역대 음량 값에 반응하여 반짝이는 정도가 변화하도록 설계하였다.



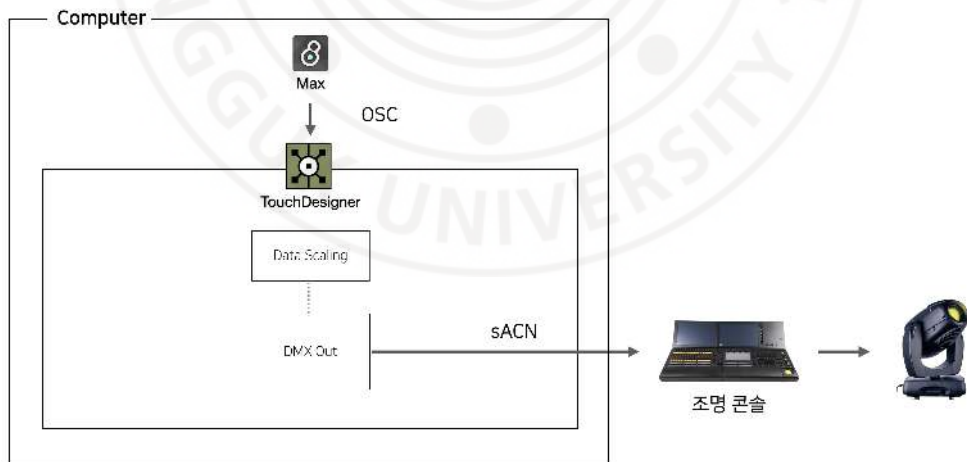
[그림-21] luma blur 효과의 변화

3. 조명 시스템 연구

1) 조명 시스템

조명을 효율적으로 사용하기 위해서는 영상이 최종적으로 빔 프로젝터를 통해 송출될 때 나오는 빛과의 간섭을 고려해야 하기 때문에 조명과 영상을 동시에 제어할 수 있는 방법에 대해 연구했다. 따라서 실시간으로 영상을 만드는 사운드 데이터를 조명에도 동시에 적용하기 위해 TouchDesigner를 사용하여 DMX 신호를 직접 조명 콘솔로 보내는 시스템을 구성했다.

[그림-22]와 같이 OSC 통신으로 Max에서 받은 사운드 데이터를 DMX 신호의 규격에 맞게 0-255 사이의 값으로 변환한 후 DMX Out CHOP을 통해 조명 콘솔로 DMX 신호를 보냈다. 그리고 이 신호를 받은 조명 콘솔이 최종적으로 조명기를 작동시킨다.



[그림-22] 조명 시스템

① 조명 하드웨어

본 연구는 GrandMA2 조명 콘솔과 VL3000 spot³⁸⁾ 조명을 사용하였다. 전용 소프트웨어 GrandMA2 onPC를 이용하면, 컴퓨터를 이용해서 직접 조명을 컨트롤할 수 있고, MA 3D 소프트웨어와 연동할 경우 극장에 들어가기 전에 시뮬레이션을 통해 작품을 구상할 수 있다.

VL3000 spot 조명은 RGB색상을 배합하고, 팬(pan), 틸트(tilt) 수치를 조정하여 조명의 각도를 움직일 수 있는 LED 무빙 라이트(moving light)이다. LED 무빙 라이트는 에너지의 절감, 긴 수명, 제어의 용이성으로 인해 기존 할로겐 조명, 형광조명을 대신하여 차세대 조명장치로 부각되고 있다. DMX 신호를 이용하여 제어할 때, 16비트로 팬, 틸트 수치를 정교하게 조절할 수 있고 다양한 조광 효과를 줄 수 있기 때문에 감성 조명을 표현하는 용도로 매우 적합하다.³⁹⁾

VL3000 spot 조명은 한 대당 28개의 DMX 채널이 할당된다. 예를 들어, 6대의 조명을 사용하기 위해서는 168개의 채널이 필요하다. 특히 팬, 틸트와 같이 16비트(bit)를 사용하는 파라미터가 있으므로, DMX 신호는 한 채널이 8비트로 이루어져 있으므로 신호를 보낼 때 16비트로 변환해야 한다.

② Ethernet을 통한 DMX 신호 전송

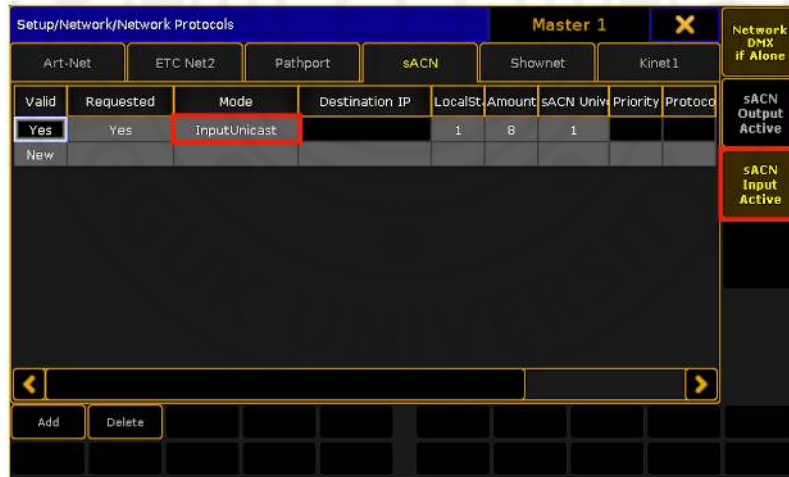
DMX는 무대 조명과 특수효과를 제어하는 디지털 통신 네트워크의 표준이다. 512채널의 DMX는 각각 8비트로 제어되며, 0부터 255까지의 값을 갖는다. 만약 더 정밀한 제어가 필요하여 16비트를 사용하는 경우 2개의 DMX 채널을 사용한다. 하나의 케이블 당 512개의 DMX 채널을 제어할 수 있으며 이것을 하나의 'Universe'라고 한다.

38) Vari Lite에서 만든 조명기로 spot은 좁은 범위를 비추는 데에 용이하다.

39) 김태권, 김경만, 강찬호 「DMX512 프로토콜을 이용한 LED 무빙라이트 무선제어 시스템 설계」, 전력전자학회, 2012.

본 연구에서는 컴퓨터를 사용하여 XLR 케이블 대신 이더넷 케이블을 통해 DMX 신호를 보냈다. XLR은 케이블 1개당 하나의 Universe만 제어할 수 있고 컴퓨터에 연결하는 경우 별도의 하드웨어가 필요하다. 따라서 여러 대의 조명기를 한 번에 제어하기 위해 이더넷을 통해 조명 콘솔과 연결하는 방식을 사용했다.

이더넷을 사용하여 DMX 신호를 보내는 방법은 대표적으로 Art-Net⁴⁰⁾과 sACN⁴¹⁾이 있다. 둘 다 IP 주소를 이용하여 Universe를 전송할 수 있는 프로토콜이며, 하나의 이더넷 케이블로 30,000개 이상의 Universe를 전송할 수 있다. 하지만 Art-Net은 IP 주소를 2.x.x.x 또는 10.x.x.x를 사용해야 한다는 제약이 있다. 따라서 다른 무선 통신과의 원활한 연결을 위하여 본 연구에서는 sACN을 사용하였다. 조명 콘솔과 컴퓨터를 이더넷 케이블로 연결하고 [그림-23]과 같이 콘솔의 설정에서 sACN Input을 활성화하면 멀티 콘솔 시스템을 사용할 수 있다.



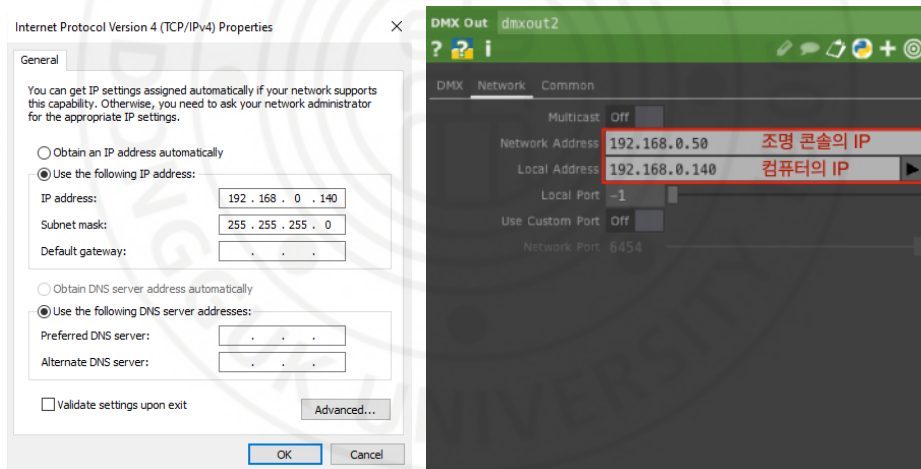
[그림-23] GrandMA2 콘솔 설정

40) 조명을 제어하는 DMX 또는 원격 장치 관리 신호를 전송하기 위한 통신 규약. 조명기와 조명 콘솔 및 조명을 제어하는 소프트웨어 사이의 통신에 사용된다.

41) streaming-ACN의 줄임말로 네트워크를 통해 DMX universe를 효율적으로 전송하기 위해 ESTA에서 만든 통신 규약이다.

③ TouchDesigner를 활용한 조명 콘솔

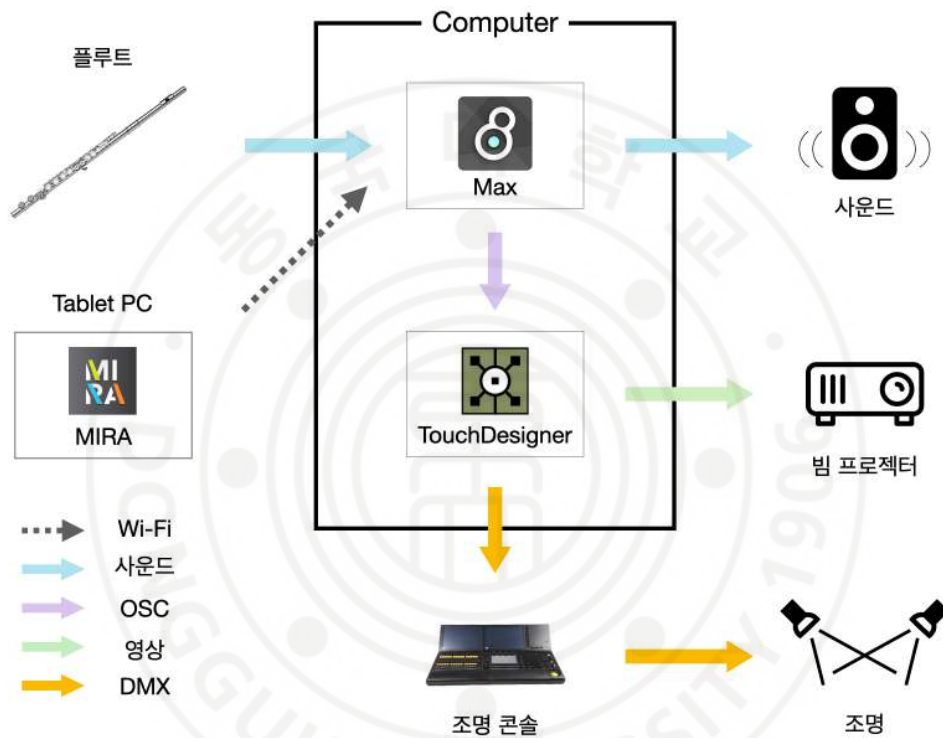
TouchDesigner의 DMX Out CHOP을 사용하여 DMX 신호를 내보낼 수 있다. 가장 중요한 부분은 Network탭에서 Network Address와 Local Address를 설정해 주는 것이다. sACN 프로토콜을 사용할 경우, 콘솔과 컴퓨터를 하나의 공유기에 연결하고 컴퓨터 인터넷의 IP 주소를 수동으로 설정한다. 콘솔의 기본 IP 주소는 192.168.0.x로 시작하므로 이와 똑같이 컴퓨터의 IP 주소를 192.168.0.x (x는 임의의 숫자)로 맞춘다. 하지만 두 주소를 똑같이 하면 주고받는 두 가지의 신호가 서로 충돌하므로 반드시 끝자리는 다르게 맞추어야 한다. [그림-24]의 왼쪽 이미지와 같이 컴퓨터의 IP 주소를 수동으로 변경하고 TouchDesigner의 DMX Out CHOP의 Local Address에 입력한다.



[그림-24] 수동 IP 변경과 DMX Out CHOP 설정

4. 공연 시스템 연구

1) 공연 시스템



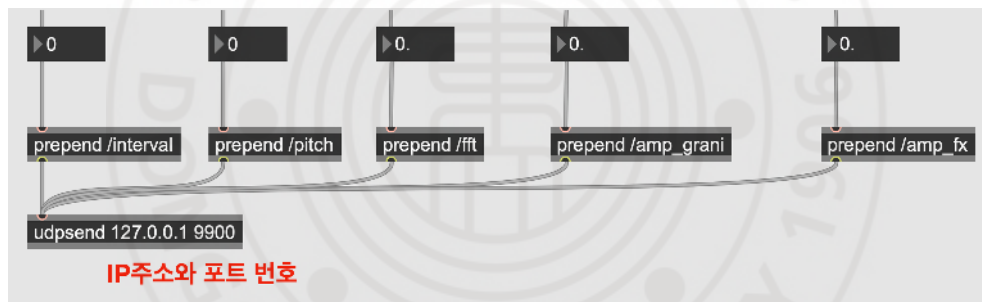
[그림-25] 공연 시스템 설계도

[그림-25]는 무대에서 사용되는 사운드와 영상, 조명의 총 시스템 설계도이다. 플루트에 사용한 마이크는 SHURE의 SM57이며 모노(mono)로 사운드 입력을 받았다. 이 사운드는 오디오 인터페이스를 거쳐 컴퓨터로 입력되며 Max를 통해 사운드 프로세싱을 거쳐 스피커로 출력된다. OSC 신호를 기반으로 Max에서 TouchDesigner로 실시간 사운드 데이

터가 전송되고, 이 수치들에 의해 만들어진 영상은 프로젝터로 출력된다. 그리고 사운드의 특정 데이터는 0-255의 수치로 변환되어 DMX 신호로 조명 콘솔에 전송되며 최종적으로 조명을 제어한다. 그리고 오퍼레이터는 태블릿pc로 MIRA⁴²⁾를 사용하여 Max의 실시간 사운드 프로세싱을 원격으로 제어한다.

2) OSC 통신을 이용한 인터랙션 시스템

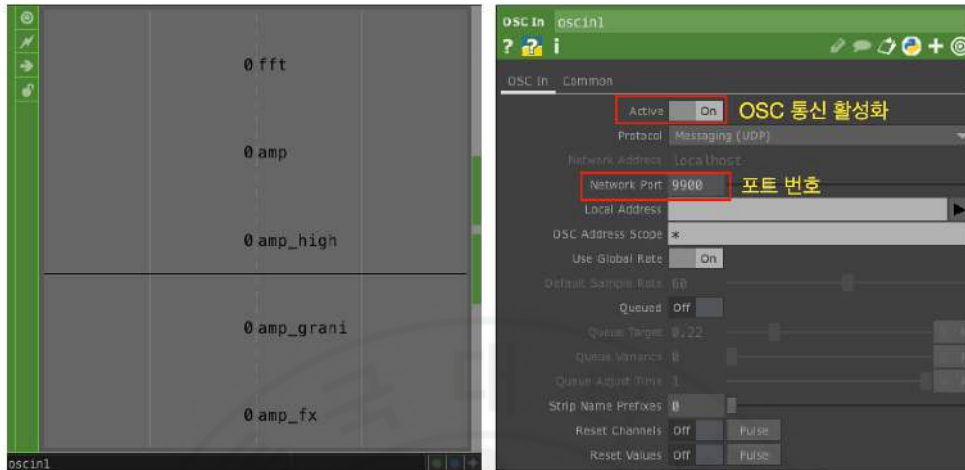
사운드와 실시간으로 연동되는 비주얼을 제작하기 위해 OSC 통신을 사용하여 Max에서 TouchDesigner로 사운드의 데이터를 전송하였다.



[그림-26] OSC 통신을 위한 Max 패치

[그림-26]은 Max에서 udpsend 오브젝트를 사용하여 OSC 신호를 보내는 패치이다. 개별의 사운드의 데이터에 prepend 오브젝트를 이용하여 이름을 지정해주면 각 데이터가 이름이 일치하는 채널로만 수치를 전송한다. udpsend는 IP 주소와 포트 번호를 지정해주어야 하는데, 한 컴퓨터 내에서 두 소프트웨어가 통신하는 것이기 때문에 localhost인 127.0.0.1로 설정한다. 포트 번호는 임의로 설정한다.

42) Cycling '74에서 개발한 iPad 전용 어플리케이션으로 WiFi 연결을 통해 Max를 원격 제어할 수 있다.



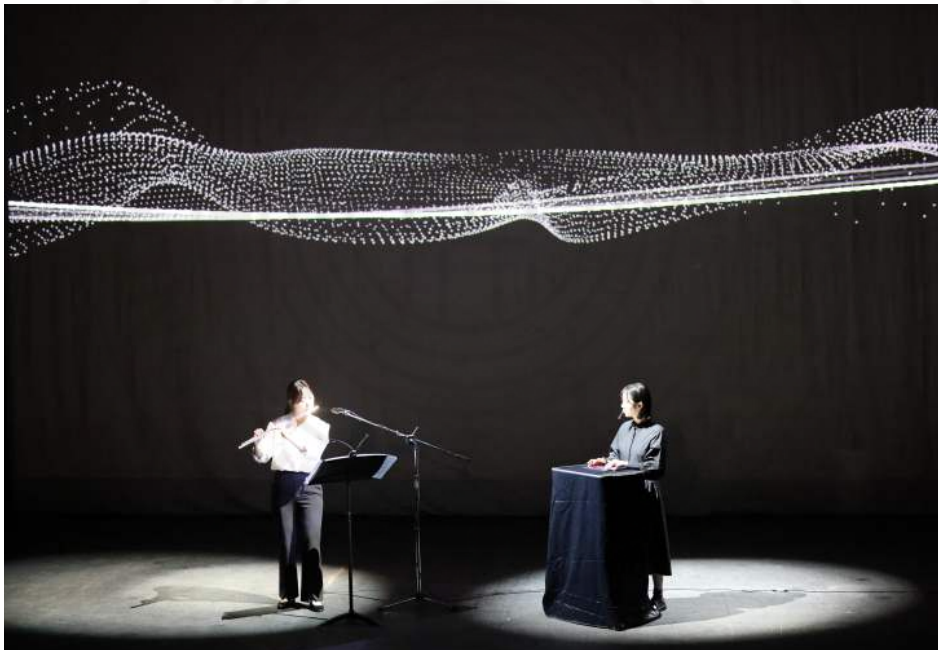
[그림-27] TouchDesigner의 OSC In CHOP

TouchDesigner의 OSC In CHOP의 설정은 [그림-27]과 같다. Active-On 으로 OSC 통신을 활성화 해주고, Max의 udpSEND에서 지정한 것과 같은 포트 번호를 입력한다. OSC 통신이 시작되면 Max의 prepend에서 지정해 준 것과 같은 이름의 채널이 생성되고 이 데이터를 실시간 영상 제작 및 DMX 신호에 사용할 수 있다.

Ⅲ. 연구 기술의 작품 적용

연구된 플루트의 실시간 사운드 프로세싱과 인터랙티브 영상 및 조명을 활용한 멀티미디어 작품 <ATTUNE>은 2021년 11월 13일 동국대학교 이해랑예술극장에서 진행된 공연 ‘보는 소리, 듣는 영상 XVIII’에서 초연되었다.

1. 작품 소개



[그림-28] 작품 <ATTUNE>의 실제 공연 이미지

작품의 제목 <ATTUNE>은 detune과 반대되는 의미로, 사전적 정의는 ‘맞추어 가다’, ‘조율하다’이다. 모든 사물은 서로 다른 파장을 가지고 있다. 어떤 파장은 눈으로 볼 수 있고 어떤 파장은 청각적으로만 지각할 수 있다. 대부분의 파장들은 서로 다른 모양으로 약간씩 어긋난 채로 존재하지만 그 모든 파장이 합쳐져 하나의 파동으로 이루어질 때 인간의 경험으로 환원될 수 있다. 본 작품은 사운드와 영상, 조명을 활용한 멀티미디어 작품으로 서로 다른 파장들이 합쳐지며 조화를 이루고 비로소 서로의 불완전성을 채워주는 존재가 됨을 보여준다.

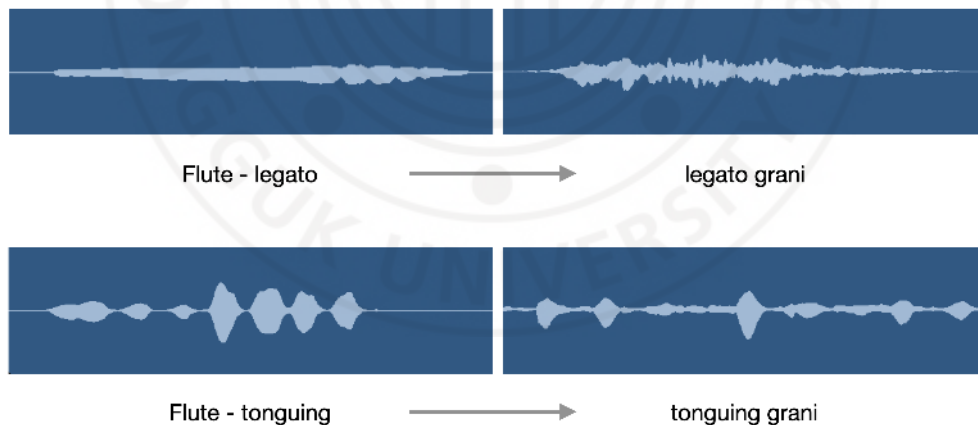
본 작품에서는 플루트의 어쿠스틱 사운드 특성을 이용하고 그 한계를 뛰어넘는 음악적 풍부함을 위해 컴퓨터를 이용하여 실시간 사운드 프로세싱을 적용했다. 여기에 실시간으로 반응하는 영상은 긴장과 해소를 반복하는 음악의 분위기를 시각화 하고 조명 또한 현장감과 공간감, 그리고 몰입감을 준다. 플루트 연주와 사운드 프로세싱, 영상, 조명의 모든 요소들은 서로 불일치함에서 출발하지만, 하나의 기준이 되는 파장에 의해 반응하며 상호작용(interaction)을 이루고 결국 사운드의 시각화를 통한 균형과 조화의 경험을 제공한다.

2. 작품의 구성 및 기술 적용

1) 음악의 구성 및 기술 적용

본 작품에서 granular synthesis는 플루트의 어쿠스틱 사운드와 조화를 이루도록 grain의 길이와 간격을 동시에 조작하여 플루트의 두 가지 주법을 모방하였다. 하나는 grain의 길이가 길고 간격을 짧게 재생하여, 마치 사람의 숨이 뻗어나가는 듯이 길게 이어지는 레가토(legato) 주법을 묘사한 legato grani이다. 그리고 텅잉(tonguing) 주법을 묘사하기 위해 grain의 길이가 짧고 간격을 넓게 재생하여 tonguing grani를 만들었다. 따라서 플루트의 연주와 함께 음악 전반에 적용되는 granular synthesis 효과가 조화롭게 어우러지도록 하였다.



[그림-29]는 플루트의 각 주법 별 파형과 granular synthesis 효과로 만든 legato grani와 tonguing grani의 파형을 비교한 것이다.



[그림-29] 플루트의 주법 별 파형과 grani의 파형

cross synthesis 효과에 서로 다른 envelope을 적용하여 두 가지 사운드를 만들었다. cross synth-1은 사운드의 attack이 길고 release가 짧다. FM합성음과 플루트의 사운드를 합성한 후 추가로 comb filter⁴³⁾ 효과를 적용하여 일렉트릭 기타와 유사한 강렬한 사운드가 서서히 고조되도록 하였다. 그리고 cross synth-2는 반대로 attack이 짧고 release가 길다. 따라서 플루트의 사운드를 종소리와 같은 형태로 변형하였고 여기에 delay 효과를 추가하여 몽환적인 사운드를 구현하였다. <표-4>는 cross synthesis를 활용하여 만든 사운드의 특징과 그 효과를 보여준다.

<표-4> cross synthesis를 활용한 사운드

사운드	envelope 형태	추가된 사운드 프로세싱	효과
cross synth-1		comb filter	플루트의 음색을 변형하여 강렬한 일렉트릭 기타의 음색 구현
cross synth-2		delay	플루트의 음색을 가진 종소리가 길게 이어지는 몽환적인 사운드 구현

A파트는 도입부에 해당하는 구간으로 플루트 연주와 같은 음고의 legato grani를 사용하여 안정적인 분위기 및 조화의 상태를 묘사한다. 여기서 서로 다른 음고를 가진 두 개의 legato grani를 겹쳐서 사용함으로써 약간의 변주를 주었고, phase vocoder는 두 배 빠른 역재생과 1옥타브 위로 pitch shifting을 적용하여 반짝이는 플루트의 음색을 더욱 강조하는 효과를 주었다. 전반적으로 A파트는 조화와 균형의 상태에서 출발한다.

43) 직접음에 대한 지연음(반사음)이 매우 짧은 시간차에 의해 겹쳐지며 만들어지는 효과이다.

B파트는 긴장과 해소가 반복되며 플루트 연주가 텅잉 및 플러터 텅잉으로 진행됨에 따라 tonguing grani를 사용하여 긴장감이 고조된다. 또한 1옥타브 낮은 legato grani가 베이스 사운드를 역할을 한다. 그리고 일렉트릭 기타 음색의 cross synth-1 사운드는 이 긴장감을 더 격렬하게 끌어올렸다가 해소시킨다.

C파트는 B파트의 모든 긴장이 해소되고 고요한 상태에서 시작한다. 플루트의 맑은 어쿠스틱 사운드로 시작하며, attack이 짧고 release가 긴, 중소리와 유사한 cross synth-2 사운드가 분위기를 더욱 몽환적이고 신비롭게 만들어 준다.

마지막으로 A'파트는 작품의 마무리 구간으로 마치 처음으로 되돌아온 것처럼 도입부와 같은 멜로디 라인으로 시작한다. 하지만 계속해서 새로움을 향해 달려가는 분위기로 변주가 시도되고 A파트보다 훨씬 더 많은 legato grani와 tonguing grani가 겹쳐서 사용된다.

<표-5>는 각 파트별로 주로 쓰인 플루트의 주법과 Max로 적용한 실시간 사운드 프로세싱의 종류를 정리한 것이다.

<표-5> 파트별 주요 플루트 주법과 사운드 프로세싱

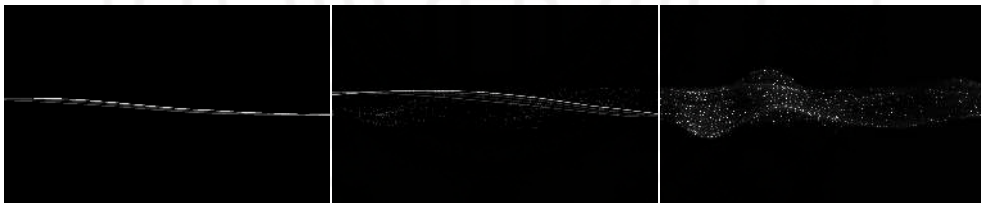
파트	주요 플루트 주법	사운드 프로세싱
A	레가토	legato grani phase vocoder
B	텅잉 하모닉스	legato grani (bass) tonguing grani cross synth-1
C	레가토	legato grani cross synth-2 phase vocoder
A'	레가토	legato grani tonguing grani phase vocoder

2) 영상의 구성 및 기술 적용

플루트의 어쿠스틱 사운드에서 가장 크게 시각화한 요소는 바로 음고의 ‘높낮이 변화’이다. 이것은 선의 움직임으로 나타나고 작품에서 사용한 모든 영상의 토대가 된다.

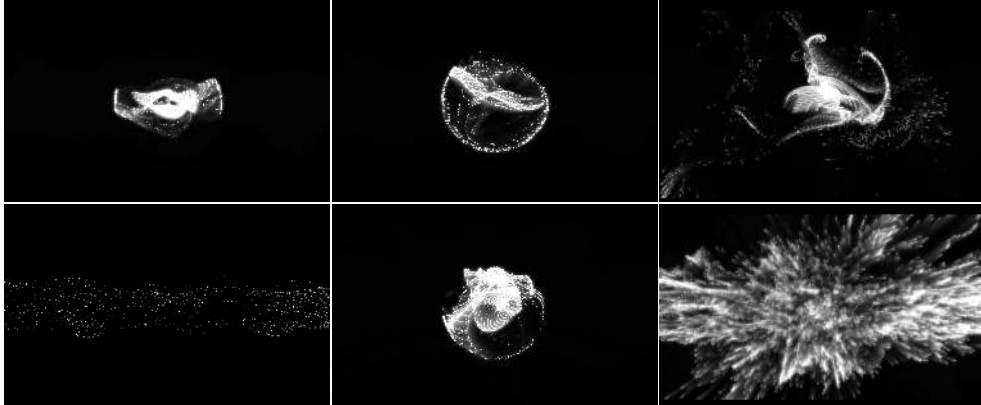
사운드 프로세싱 중 granular synthesis 효과는 그 자체로 알갱이라는 개념에서 비롯된 것으로 이 효과의 음량 값은 작은 입자(particle)로 시각화된다. 이 입자들은 force 값에 의해 다양하게 움직이며 각 장면별로 다르게 움직인다. 또한 여기에 luma blur 효과를 적용하여 고음역대의 음량 값이 커지는 것을 반짝이는 효과로 시각화하였다.

본 작품에서 영상은 음악과 마찬가지로 하나의 소스(=선)로부터 출발하여 변화하고, 다시 처음의 상태로 돌아오는 구조를 가지고 있다. [그림-30]은 A파트의 영상 변화이다.



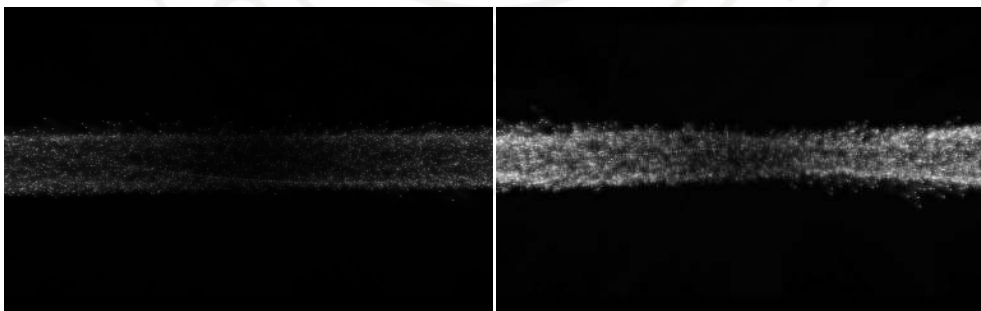
[그림-30] A파트의 영상 변화

플루트 연주로 시작하는 음악에 맞추어 선의 형태가 나타나고 grani 효과가 적용될 때마다 line particle의 형태가 나타난다. 그리고 음악이 전개되면서 점점 선의 형태는 사라지고 입자만 남아 움직인다. 선의 움직임은 플루트의 연주에 따라 변화하는데 음고가 높아질수록 위 아래로 움직이는 폭이 커지고, 음량 값이 커질수록 noise line의 형태로 나타난다.



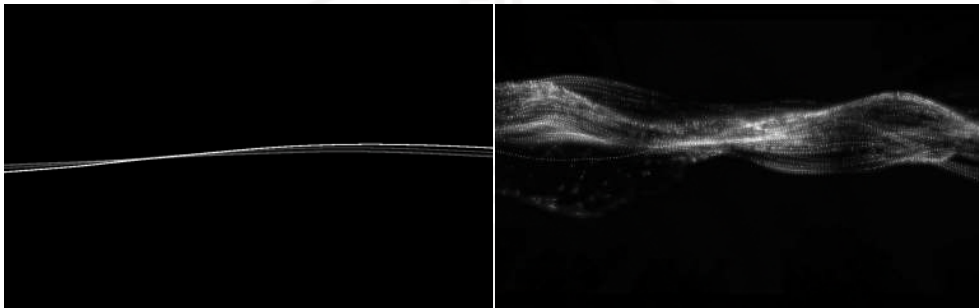
[그림-31] B파트의 영상 변화

B파트는 두 가지 형태의 particle system이 번갈아 가며 나타난다. 이전 A파트에서의 line particle 형태에서 circle particle로 변화하고 다시 line particle로 돌아간 후에 circle particle 형태로 변화한 후 이 형태가 결국 폭발하면서 B파트가 마무리된다. 중심에 모이는 입자의 형태는 긴장감이 고조된 음악을 효과적으로 시각화 하며, 입자가 모였다가 흩어지는 모습은 작품의 클라이맥스를 더욱 극적으로 보여준다.



[그림-32] C파트의 영상 변화

[그림-32]는 C파트의 영상이다. 입자의 속성 중 서로를 끌어당기는 힘인 drag 값이 0.1로 지정되어 기존의 라인 형태를 거의 유지하지 않고 force 값이 작용하지 않는다. 이러한 입자의 움직임은 몽환적이고 마치 무한한 공간에서 떠다니는 것처럼 보인다. 그리고 사운드 프로세싱의 고음역대 음량 값에 따라 luma blur 효과가 적용되어 입자가 반짝이는 인터랙션이 나타난다.



[그림-33] A' 파트의 영상 변화

마지막으로 A' 파트는 A의 도입부와 마찬가지로 선의 움직임에서 시작한다. 마찬가지로 플루트 연주의 음고에 따라 그 움직임이 커지며, 여기에 사운드 프로세싱을 적용하면서 점점 line particle로 변한다. 그러나 A파트 보다 입자의 개수는 많아졌다. 마지막 부분이지만 음악과 마찬가지로 영상 또한 도약하는 마무리를 위해 고음역대 음량 값에 따라 C파트 보다 더 많은 luma blur 효과를 적용하여 희망, 조화의 상태를 이루어 자유로워진 모습을 나타냈다.

3) 조명의 구성 및 기술 적용

사운드와 비주얼이 퍼포먼스의 형태로 관객에게 보여질 때, 무대 조명은 큰 비중을 차지한다. 빛에 의해 사물이 ‘있음’ 또는 ‘없음’을 드러내기도 하고, 보여주고자 하는 부분을 더욱 정확하게, 또는 아름답게 보이도록 할 수 있다. 본 작품은 조명을 퍼포먼스의 측면에서, 청각과 시각이 서로 상호작용 하고 있음을 더욱 극대화 하여 보여주고 몰입도를 높이고자 하는 목적으로 사용하였다. 그 중에서도 특히, 조명의 속성 중 조도(intensity)와 빛의 방향을 조절함으로써 음악의 전개와 어울리는 여러 심리적 작용을 표현하고자 하였다. 이 작품은 6대의 VL3000spot 조명기를 사용했다. 플루트 연주자와 오퍼레이터를 비추는 전광 2대, 측광 2대, 후광 2대를 배치했다. [그림-34]는 MA 3D로 구현한 무대 조명 시뮬레이션이다.



[그림-34] MA 3D로 구현한 무대 조명 시뮬레이션

A파트는 전광과 측광만 사용하였다. 따라서 안정감과 약간의 긴장감을 조성하였고, A파트에서는 인터랙션을 적용하지 않았다.

B파트의 도입부에 강한 cross synth-1 사운드가 시작되면서 이 효과의 음량 값에 따라 긴장감을 고조시키는 후광의 조도가 변화한다. 이를 통해 긴장감이 상승하는 것을 시각화함과 동시에 작품의 몰입감을 형성한다. 그리고 circle particle이 두 번째 등장하는 구간에서 조명과 사운드의 인터랙션이 시작된다. 이때 플루트 연주의 attack이 발생할 때마다 4대의 조명(전광, 측광)이 무작위로 한 대씩 켜진다.

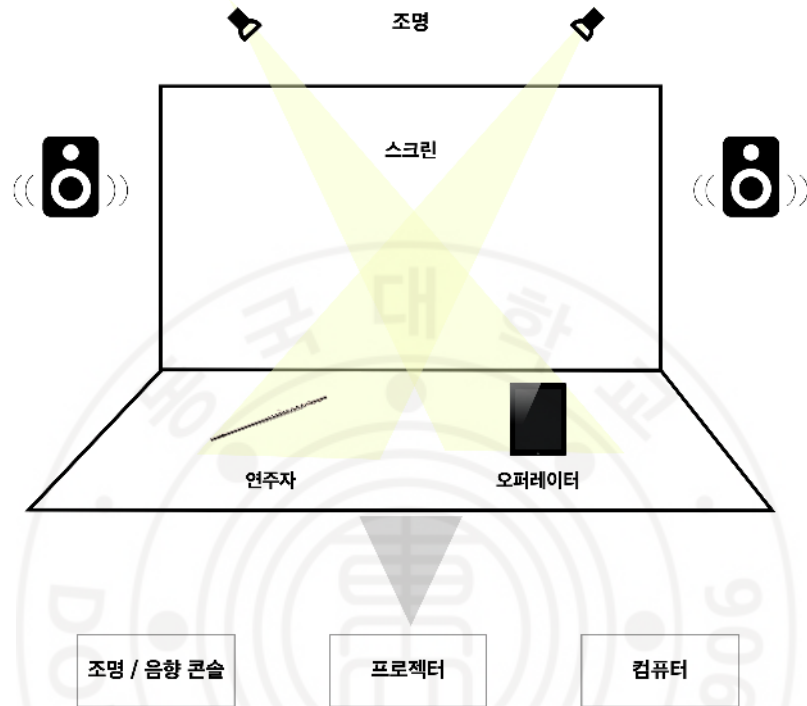


[그림-35] B파트의 조명 변화

C파트에서는 긴장이 해소되어 자유로운 상태를 나타낸다. 조명의 팬과 틸트 값에 고음역대 음량 값을 매핑하여 음고가 올라갈수록 조명도 함께 움직이며, 상승하고 몽환적인 사운드의 진행을 흩어지는 빛으로 시각화하여 보여준다.

마지막으로 A'파트는 A와 마찬가지로 전광, 측광 4개의 조명이 켜진 상태로 처음과 마찬가지로 다시 안정과 약간의 긴장의 상태를 나타낸다. 또한 이 파트는 영상의 효과를 더 잘 보여주기 위해 인터랙션을 적용하지 않았다.

4) 무대 구성



[그림-36] 무대 구성

실시간 사운드 프로세싱의 장점을 살리기 위해 플루트와 오퍼레이터가 서로 볼 수 있도록 무대 위에 배치하였다. 따라서 오퍼레이터는 플루트 연주자의 호흡에 맞추어 더 섬세한 사운드 프로세싱이 가능하며 연주자는 사운드 프로세싱을 들으며 연주의 타이밍 및 강약을 조절할 수 있다. 오퍼레이터는 MIRA app을 이용하여 원격으로 컴퓨터의 Max를 컨트롤 할 수 있기 때문에 사운드뿐만 아니라 영상과 조명을 동시에 제어할 수 있다. 따라서 관객은 플루트의 어쿠스틱 사운드와 오퍼레이터에 의해 제어되는 실시간 사운드 프로세싱을 들으며 이에 상호작용 하는 영상과 조명을 동시에 볼 수 있다.

3. 연구 기술 적용의 예술적 효과

본 작품은 플루트 연주의 실시간 사운드 프로세싱을 활용하여 마치 두 대의 악기가 앙상블을 이루는 것과 같은 효과를 낼 수 있었다. 이와 같은 효과는 플루트 악기와 조화를 염두에 두고 사운드 프로세싱을 적용하였기 때문에 가능했다. 연구한 사운드 프로세싱의 종류는 크게 3가지이며, 첫 번째로 플루트의 주법을 묘사한 grani는 마치 악기 연주의 호흡을 이어받아 함께 연주하는 듯한 음악적 표현을 할 수 있었다. 또한 피치 조절을 통해 플루트가 낼 수 없는 저음역대를 보강하는 효과가 있었다. 두 번째, phase vocoder는 높은 음고와 빠른 재생 속도로 플루트의 사운드를 변형하여 민첩하고 맑은 악기의 음색을 더욱 강조하는 효과를 얻을 수 있었다. 마지막으로 cross synthesis로 만든 두 가지 사운드 역시 pitch tracking을 통해 실시간 연주의 피치와 같은 음고의 사운드를 합성함과 동시에 플루트로 표현할 수 없는 envelope를 사용하여 음악의 흐름을 깨뜨리지 않으며 새로운 악상을 표현할 수 있었다.

사운드에 반응하도록 만든 영상은 하나의 선이 플루트 연주의 음고에 의해 움직임으로써 그 중심 흐름을 잃지 않고 전개할 수 있었다. 따라서 청각의 시각화가 유기적으로 이루어졌고 관객들이 악기의 연주가 시각화되었음을 느낄 수 있도록 하였다. 또한 사운드 프로세싱에 반응하는 영상은 음악의 기승전결을 더욱 극적으로 나타냈다. 또한 작품 내에서 조명이 부분적으로 사운드와 상호작용 함으로써 각 파트별로 음악, 영상 또는 조명이 돋보이도록 설계했고 조도와 조명의 움직임 자체를 사운드의 데이터 값으로 제어함으로써 현장감과 몰입도를 높이는 시각화를 이루었다.

IV. 결 론

본 연구는 플루트 악기의 연주에 적용되는 실시간 사운드 프로세싱과 그것에 반응하는 영상과 조명을 이용한 멀티미디어 작품 제작에 대한 연구이다. 단순히 음악에 반응하는 것뿐만 아니라 음악의 분위기와 감성에 맞추어 가장 효과적인 방식으로 시각화하기 위해 영상을 제작하고, 조명의 여러 가지 요소를 고려하여 시스템을 설계했다. Max를 사용하여 실시간 사운드 프로세싱을 연구하였으며, 작곡 과정에서 악기의 특성에 맞는 사운드 효과를 연구함으로써 새로운 작곡의 기법을 구현할 수 있었다. 여기에 영상과 조명이 사운드와 상호작용 함으로써 단순히 보거나 듣는 차원의 감상을 넘어서 총체적으로 경험하는 예술로 구현할 수 있었다. 이는 음악뿐만 아니라 연극·무용·뮤지컬 등의 다양한 퍼포먼스 장르에도 적용시킬 수 있는 가능성을 발견하였다.

하지만 무대 조명의 경우 설치 과정에서 많은 리허설 시간이 소요되는 분야이다. 특히 영상과 함께 사용할 경우 빛의 강도에 따라 두 가지 요소가 모두 잘 보이지 않는 점 까지도 고려해야 한다. 이러한 점을 보완하기 위해 다양한 시뮬레이션 프로그램이 있지만 실제 극장 환경과 프로젝터의 사양을 고려하여 사전에 리허설을 하고 수정하는 과정이 필요하다. 본 연구를 진행하며 극장 안에서 충분한 리허설 시간을 확보하지 못하여 영상과 조명의 컨트롤이 다소 섬세하게 이루어지지 못하였다.

또한 무대 조명을 구현할 때 사람의 존재 여부는 고려해야 할 중요한 요소이다. 그러나 오퍼레이터와 연주자가 무대 위에 있는 경우에 대한 대비가 꼼꼼하게 이루어지지 못했다.

그럼에도 플루트 연주자와 오퍼레이터가 함께 무대 위에서 호흡함(상호작용)으로써 실시간 프로세싱의 장점을 극대화 할 수 있었다. 또한 관객으로 하여금 어쿠스틱 사운드와 실시간 프로세싱·영상·조명의 상호

작용이 멀티미디어 작품에서 어떻게 이루어지는지 보여줄 수 있었다.

본 연구를 통해 겪은 문제점을 보완하고 이를 바탕으로 다양한 매체를 이용한 멀티미디어 작품에 대한 연구를 이어나갈 것이다. 이처럼 과학 기술을 예술의 도구로써 사용할 때 기술에 대한 이해뿐만 아니라 면밀한 분석과 감각적인 적용 방식을 연구하는 것은 예술의 다양성을 확보하고 새로운 형태의 예술을 창조하는 것에 기여할 것이다.



Keyword(검색어):

컴퓨터음악(computer music), 멀티미디어 작품(multimedia performance), 소리시각화(sound visualization), Flute, TouchDesigner, DMX, 실시간 사운드 프로세싱(real-time sound processing)

E-mail: leh0245@dgu.ac.kr

참 고 문 헌

1. 단행본

- 이석원, 「음악음향학」, (심설당, 2003)
- Samuel Adler, 「The Study of Orchestration」, (W. W. Norton & Company, 1982)
- Mark Ballora, 「Essentials of Music Technology」, (AbeBooks, 2003)
- Joel Chadabe, 「Electric Sound: The Past and Promise of Electronic Music」, (Prentice Hall, 1997)
- Roger T. Dean, 「The Oxford Handbook of Computer Music」, (Oxford University Press, 2009)
- Thom Holmes, 「Electronic and Experimental Music」, (Routledge, 2002)
- Brenda Laurel, 「Computer as Theatre」, (Addison-Wesley Professional, 2015)
- Glenn D. White, Gary J. Louie, 「The Audio Dictionary」, (University of Washington Press, 2005)

2. 참고논문

- 김태권, 김경만, 강찬호, 「DMX512 프로토콜을 이용한 LED 무빙라이트 무선제어시스템 설계」 (전력전자학회 전력전자학술대회 논문집, 2012)
- 이장원, 「무대공연조명에서 빛과 색에 관한 연구」 (월간전기, 2009)
- 김선아, 「플루트의 발달과정 및 현대적 기법에 관한 연구」 (중앙대학교 예술대학원 음악학과, 2007)
- 김진우, 「우두 드럼의 실시간 사운드 프로세싱을 이용한 멀티미디어음악 작품 제작 연구」 (동국대학교 영상대학원 멀티미디어학과, 2021)
- 임준형, 「Max/MSP와 New Media Art를 이용한 인터랙티브 멀티미디어 퍼포먼스 제작 연구」 (동국대학교 영상대학원 멀티미디어학과, 2020)
- 조환희, 「베이스 트롬본과 피아노의 실시간 사운드 프로세싱을 이용한 멀티미디어작품 제작 연구」 (동국대학교 영상대학원 멀티미디어학과, 2019)

3. 웹사이트

<https://cycling74.com>

<https://derivative.ca>

<https://www.malighting.com>

<https://ccrma.stanford.edu>

ABSTRACT

A Study on Interactive Multimedia Performance using Real-time Sound Processing of Flute (focus on Multimedia Performance <ATTUNE>)

Lee, Eun Hwa

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

This study is on multimedia performance that applies sound processing of flute in real-time and controls video and stage lighting responding to the sound. All sound processing is derived from the performance of the flute. And the video and lighting are also transformed by the sound data.

Sound processing applied to the flute is granular synthesis, phase vocoder, and cross synthesis. All sound processing is made by Max. It is applied to harmonize and make up for the insufficient harmonic tone of the flute and to implement a new timbre.

Video of line and particle system, which is a visual element, is mainly used to effectively visualize the sound. In addition, data of sound such as pitch and amplitude level has been received through OSC communication and mapped to parameters of each process of generating video. Therefore, the video responsive to sound could be implemented.

Similarly, stage lighting is controlled by sound data. The OSC data received by TouchDesigner is converted into a value between 0–255 to send a DMX signal to the lighting console. Therefore, it was possible to create a system in which sound data controls the lightings. Stage lighting has not only contributed to visualization but also played a role in maximizing the immersion and realism of the performance. This further provides the audience an experience in which the auditory and visual senses are connected.

As a result, it was possible to create a more advanced form of multimedia performance visualizing sound.

부록-1 : 작품 <ATTUNE> 악보

ATTUNE

♩ = 100

Lee, Eun Hwa

A

5

9

13

17

21

25

B

29

33

tr

74 3

77

80

83 *ff*

86 **C** *p* *p*

90 *mf* *mf*

94 *8*

98

102

106 *f*

110 **A** *mp*

114

118

122

126

130

134 *tr* *f*

138 *mp*

부록-2 : 첨부 DVD 설명

1. ATTUNE : 2021년 11월 13일 이해랑예술극장 공연 실황
2. ATTUNE_TD : 작품에 사용된 TouchDesigner 패치
3. ATTUNE_Max : 작품에 사용된 Max 패치 폴더

