

석사학위논문

관상(contemplation)의 구조적 특성에 기반한
소리합성과 실시간 시각화 알고리즘 연구
-멀티미디어 작품 <Paschal Resonance>를 중심으로-

지도교수 김 준

동국대학교 영상대학원 멀티미디어학과

김 태 원

2026

석사학위논문

관상(contemplation)의 구조적 특성에 기반한
소리합성과 실시간 시각화 알고리즘 연구
-멀티미디어 작품 <Paschal Resonance>를 중심으로-

김 태 원

지도교수 김 준

이 논문을 석사학위논문으로 제출함

2025 년 12 월

김태원의 음악석사(컴퓨터음악) 학위 논문을 인준함

2026 년 1 월

위원장 정진헌



위원 김정호



위원 김준



동국대학교 영상대학원

목 차

I. 서 론	1
1. 연구의 배경 및 목적	1
1) 역사적 배경	1
2) 연구의 필연성 탐구	2
3) 연구의 목표와 방법론	3
II. 본 론	5
1. 관상의 개념과 본 연구의 접근 관점	5
2. 관상의 시간성 분석	7
3. FM합성 분석	10
1) FM합성의 기본 원리	10
2) 사이드밴드 분포와 비선형성	11
3) 주파수 비율에 의한 스펙트럼 구조 결정	12
4) 오퍼레이터 기반의 FM합성 구조	13
5) 기존 FM합성 시스템의 구조적 한계	14
4. 멀티채널 폴리모듈레이션FM 시스템의 설계	17
1) 신호 흐름 설계	18
2) MIDI 이벤트 프로세싱 계층 설계	19
3) 스테레오 오실레이터 드리프트 프로세싱 설계	22
4) 진폭 신호 흐름 시스템의 설계	25
① 엔벨로프 제네레이터	25
② 키 트랙킹	26
③ 익스프레션 제어	27

④ 최종 출력단 설계	29
⑤ 멀티채널 오퍼레이터(2-4)의 구조와 시스템 통합	31
5. 비주얼 디자인 시스템 설계	33
1) 설계 개요	33
① 비주얼 패치의 목적	33
② 이미지 분리 원칙	34
③ 시각화 시스템의 전체 구조	34
2) 데이터 맵핑 구조	35
① 에너지 기반 데이터	36
② 시간·노트 기반 데이터	36
③ 위상 기반 데이터	37
3) 시각화 모듈별 설계	39
① 데이터 입력 및 분배 계층	39
② 글로벌 렌더링 루프와 시각화 트리거 제어 구조	41
③ 라인 드로잉 계층의 좌표 생성 모듈 설계	44
④ 라인 드로잉 계층 설계	47
⑤ 리사주 패턴 및 변형 모듈	53
⑥ 비주얼 계층의 최종 통합과 출력	58
III. 연구 기술의 작품 적용	60
1. 작품소개	60
1) 작품 개요	60
2) 작품 서술	61
2. 작품 구성	62
1) 시스템 구성	62
2) 사운드 및 영상 구성	64

① 사운드 기술 적용	64
② 관상적 시간성에 따른 시스템의 상태 전이와 구조 분석	66
가. 1구간: 초기 안정 영역	67
나. 2구간: 미세 변동의 출현 영역	67
다. 3구간: 변동의 밀도의 집중 영역	67
라. 4구간: 변동의 확산 영역	68
마. 5구간: 재안정화 영역	68
③ 영상 기술 적용	70
IV. 결론	74
참고문헌	77
ABSTRACT	80
부록: 첨부 DVD 설명	82

표 목 차

〈표-1〉 관상의 요소와 FM합성 요소의 구조적 치환에 관한 표	9
〈표-2〉 시스템 상태 전이에 따른 구간별 기술적·감각적 특성 분석 ...	69

그 립 목 차

[그림-1] FM합성의 출력 주파수 스펙트럼	11
[그림-2] FM합성 변조지수에 따른 사이드밴드의 진폭변화	12
[그림-3] 오퍼레이터의 구조	13
[그림-4] Yamaha의 DX7	14
[그림-5] DX7의 알고리즘	14
[그림-6] 멀티채널 폴리 모듈레이션 FM합성의 시그널 흐름 구조 ...	18
[그림-7] MIDI 이벤트 프로세싱 계층 패치 구조	20
[그림-8] 오실레이터 드리프트 처리 패치 구조	22
[그림-9] 스테레오 오실레이터 피치 드리프트 알고리즘 코드 구조 ...	23
[그림-10] 엔벨로프 제네레이터 패치 구조	25
[그림-11] 키 트래킹 패치 구조	26
[그림-12] MIDI 익스프레션 제어 패치 구조	27
[그림-13] 최종 출력단 설계 패치 구조	29
[그림-14] 멀티채널 폴리 모듈레이션 FM의 M4L 패치 구조	32
[그림-15] M4L 데이터를 Jitter 패치로 전달하기 위한 패치 구조 ...	40
[그림-16] Jitter로 패치로 전달된 M4L 데이터 구조	40
[그림-17] 글로벌 렌더 루프 패치 구조	42
[그림-18] 시간에 따른 erase_color의 변화	43

[그림-19] 좌표 생성 모듈 패치 구조	44
[그림-20] 라인 드로잉 계층을 위한 y축 데이터 생성 패치 구조	45
[그림-21] 라인 드로잉 계층을 위한 x축 데이터 생성 패치 구조	46
[그림-22] 라인 드로잉 계층의 패치 구조	48
[그림-23] GL텍스처를 매트릭스로 변환하는 패치 구조	49
[그림-24] vizzle의 비주얼 이펙터 시그널 구조	52
[그림-25] 완성된 라인 드로잉 계층의 이미지	53
[그림-26] 리사주 패턴 생성 패치 구조	54
[그림-27] x축 과 y축으로 전송된 오디오의 리사주 패턴화	55
[그림-28] 리사주 전용 GL 서브컨텍스트 구성 및 텍스처에서 매트릭스로의 변환 구조	56
[그림-29] vizzle의 SLIDR	57
[그림-30] XFADR 기반 최종 이미지 블렌딩과 world1 출력 구조 ..	58
[그림-31] XFADR로 합쳐진 두 텍스처 계층	59
[그림-32] 작품 ‘<Paschal Resonance>’의 공연 실황	60
[그림-33] 실시간 음향 및 시각화 통합 시스템 구성도	62
[그림-34] 각 오퍼레이터별 독립된 MIDI 입력 구조	64
[그림-35] Ableton Live의 CC Control 미디 이펙트	65
[그림-36] OP1-OP4의 독립적 CC11: expression 오토메이션	66
[그림-37] 점진적인 색상의 변화	70
[그림-38] 시간에 따른 라인 드로잉의 5단계 변화 구조	71
[그림-39] 구간에 따른 세 시각화 계층의 통합 변화	72

I. 서론

1. 연구 배경 및 목적

1) 역사적 배경

서양 예술음악은 중세 이래 가톨릭 전례¹⁾를 중심으로 형성되었으며, 그레고리안 성가(Gregorian Chant)²⁾는 음향을 통해 신학적 의미를 드러내는 ‘노래하는 신학’으로 기능하였다. 이 전통은 기욤 드 마쇼(Guillaume de Machaut, 1300?-1377)³⁾, 그리고 후대 파레스트리나(Giovanni Pierluigi da Palestrina, 1525-1594)⁴⁾와 메시앙(Olivier Messiaen, 1908-1992)⁵⁾ 등에 의해 구조적·신학적 질서로 정교화되며, 음악이 단순한 감각적 예술을 넘어 정신적·영적 의미를 드러내는 장으로 작동해 왔다. 그러나 18세기 이후 계몽주의⁶⁾적 전환과 세속 중심의 음악 제도 확립은 이러한 구조적 신학의 역할을 음악에서 점차 약화시켰으며, 종교적, 영적 주제는 공적 구조에서 벗어나 개인적 성찰의 차원으로 이동하게

1) 전례는 기독교 공동체가 공적 예배 안에서 수행하는 기도와 의식의 총체를 의미하며, 가톨릭 전통에서는 미사, 성무일도, 성사 예식 등이 이에 포함된다.

2) 8세기에서 9세기 사이에 서방 교회 전례를 위해 정비된 단선율 성가 전통이다.

3) 14세기 아르스 노바 시대를 대표하는 작곡가이자 시인. 다성 미사곡인 Messe de Nostre Dame을 통해 중세 다성음악의 구조적 정교함을 확립한 인물로 평가된다.

4) 16세기 로마 악파를 대표하는 교회음악 작곡가. 트리엔트 공의회 이후 가톨릭 교회가 요구한 명료한 성가 전달 원칙에 부합하는 대위적 양식을 정립했다.

5) 20세기 프랑스의 작곡가이자 오르가니스트로, 가톨릭 신학과 영성을 음악적 언어의 핵심으로 통합한 인물로 알려져 있다. 그는 성가적 선율, 비가역 리듬, 제한된 전조의 모드(modes à transpositions limitées) 등을 기반으로 독자적 음향 체계를 구축하였으며, 종교적 상징성과 관상적 시간성을 현대 음악 속에서 확장한 대표적 작곡가로 평가된다.

6) 17세기 후반에서 18세기 유럽에서 전개된 이성 중심의 사상적 흐름을 지칭하며, 절대주의와 교회 권위에 대한 비판을 바탕으로 인간의 이성과 경험을 강조한 문화·지적 운동을 말한다.

되었다. 이 변화는 종교음악의 쇠퇴를 의미하는 것이 아니라, 영적, 내적 구조를 표현할 새로운 예술 언어에 대한 필요성을 제기한다. 특히 현대의 전자음향 환경은 소리를 미시적으로 다루고 실시간으로 변형할 수 있는 기술적 가능성을 바탕으로, 과거 전례 음악이 수행하던 ‘구조적 의미 표현’의 기능을 현대적으로 재해석할 수 있는 유효한 대안이 된다.

2) 연구의 필연성 탐구

본 연구는 이러한 맥락 속에서 ‘관상(contemplation)⁷⁾’이라는 가톨릭 영성의 개념을 현대 전자음향으로 재해석하여 표현해 보고자 한다. 관상은 전례의 공적 차원보다 개인의 내면적 여정에 가까운 기도로, 외적 자극을 최소화하고 미세한 내적 리듬에 주의를 기울이는 상태를 의미한다. 관상은 전례와 직접적인 기능적 관계를 갖지는 않지만, 전례가 제시하는 신학적 질서를 인격적으로 받아들이고 체험하는 방식이라는 점에서 중요한 영적 구조를 형성한다. 현대 전자음악은 이러한 관상의 내적 구조인 중심의 고요, 주변의 미세한 움직임, 시간의 비단선성을 기술적으로 표현할 수 있는 유력한 도구를 제공한다. FM합성(frequency modulation synthesis)⁸⁾의 위상·주파수 변조 구조는 관상의 시간성을 모델링하는 데 적합한 특성을 지니고 있으며, 실시간 데이터 기반의 시

7) 가톨릭 전통에서 외적 활동보다 내적 침묵과 주의를 통해 하느님과의 일치를 추구하는 기도이다.

8) FM합성은 하나의 주파수를 가진 신호(캐리어)를 다른 신호(모듈레이터)로 변조하여 새로운 배음 구조를 생성하는 전자음향 합성 기법이다. 1960년대 스탠퍼드 대학교의 존 초우닝(John Chowning)이 이론적 기반을 정립하였으며, 단순한 파형 간 상호작용을 통해 복잡한 스펙트럼 변화를 만들어낸다는 점에서 현대 전자음악의 중요한 전환점으로 평가된다. FM합성은 변조 지수와 주파수 비율에 따라 다양한 음색을 생성할 수 있으며, 특히 비선형적 스펙트럼 확장을 효율적으로 구현할 수 있는 합성 방식으로 알려져 있다.

각화는 소리 내부의 질서를 외부적 이미지로 투명하게 드러낼 수 있는 기반을 제공한다. 따라서 본 연구는 관상을 신학적 논문의 주제로 삼으려는 것이 아니라, 관상이 지닌 구조적 특징을 현대 음향·멀티미디어 기술의 설계 원리로 변환해 보는 실험적 탐구를 목적으로 한다.

3) 연구의 목표와 방법론

본 연구는 관상의 내적 구조를 현대 전자음향 언어로 재해석하기 위해 다음의 목표를 설정한다. 첫째, 관상의 구조적 특징을 FM합성의 알고리즘적 구성 요소로 치환하는 모델을 설계한다. 이를 위해 본 연구는 모든 오퍼레이터(operator)의 발진 주파수를 기준 주파수의 1-16번째 정수배로 고정하는 제한 조건을 설정하고, 단일한 캐리어(carrier)와 여러 변조자(modulator)가 서로 다른 위상과 시간 흐름을 갖도록 구성한다. 이러한 방식은 관상의 중심적 안정성과 주변적 움직임의 공존을 음향적으로 구현하기 위함이다. 둘째, 음악적 구조를 시각적 정보와 결합하여 관상의 시간성과 질서를 공감각적으로 제시하고자 한다. Max⁹⁾의 Jitter¹⁰⁾ 환경을 통해 생성되는 기하학적 선형 패턴은 음향 신호의 위상 변화를 시각적으로 드러내며, 과도한 시각적 정보 없이 소리 내부의 관계 구조만을 제시하는 것을 목표로 한다. 셋째, 이러한 음향·시각적 구성은 본 논문의 작품 <Paschal Resonance> 내에서 통합적으로 구현되며, 작품의 주제적 배경인 관상적 시간성을 전자음향적 구조로 치환하는 실험적 방법론의 근거가 된다. 본 연구는 특정 종교적 실천을 모방하거나 전례 구조를 재현하려는 것이 아니라, 관상이 지닌 내적 리듬

9) Cycling '74에서 개발한 시각적 패치 기반의 멀티미디어 프로그래밍 환경이다.

10) Max 내부의 영상·행렬 데이터 처리 모듈로서 실시간 시각화와 그래픽 연산을 가능하게 한다.

과 질서를 현대 멀티미디어 환경에서 드러내는 시도를 제안한다.

II. 본론

1. 관상의 개념과 본 연구의 접근 관점

본 연구는 멀티채널 FM 합성 시스템과 실시간 시각화 구조를 설계하는 과정에서 ‘관상(contemplation)’을 단순한 종교적 소재를 넘어, 작품의 핵심적인 미학적 설계 원리이자 구조적 모델로 설정한다. 가톨릭 영성 전통에서 관상은 외적 활동을 최소화한 상태에서 내적 고요와 주의를 통해 하느님의 현존을 받아들이는 기도의 방식으로, 이는 정서적 고양이나 이미지의 상상보다는 고요함 속에서 미세하게 변화하는 내적 움직임에 감각하는 과정에 집중한다. 이러한 관상의 구조를 현대의 전자음향 및 기술적 언어로 치환하고자 하는 시도는 서론에서 고찰한 서양 예술음악의 역사적 흐름과 궤를 같이한다. 과거 그레고리안 성가가 음향을 통해 신학적 질서를 드러내는 ‘노래하는 신학’으로서 공적 전례의 중심을 지켰던 것처럼, 본 연구는 현대의 전자음향 기술이 과거 전례 음악이 수행하던 ‘구조적 의미 표현’의 기능을 현대적으로 재해석하고 계승할 수 있는 유효한 대안이라는 점에 주목한다. 계몽주의 이후 종교적 주제가 공적 구조에서 벗어나 개인적 성찰의 차원으로 이동했다면, 본 연구는 관상이라는 내면적 여정을 객관적인 알고리즘 구조로 치환함으로써 영적 질서를 현대적 예술 언어로 복원하고자 하는 것이다. 특히 관상이 지닌 ‘중심의 안정과 주변의 섬세한 변화’라는 구조적 특성은 본 연구의 핵심 기술인 FM합성(frequency modulation synthesis)의 원리와 긴밀한 대응 관계를 형성하며 기술적 치환의 필연성을 뒷받침한다. 단일한 기준 주파수(carrier)를 중심으로 여러 변조자(modula

tor)가 상호작용하며 복잡한 배음 구조를 형성하는 FM 합성의 메커니즘은, 확고한 내적 중심을 유지하면서도 미세한 의식의 흐름을 수용하는 관상의 역설적 상태를 모델링하기에 가장 적합한 도구가 된다. 모든 오퍼레이터의 주파수를 기준 주파수의 정수배로 제한하여 질서를 부여하고, 그 안에서 위상과 시간 흐름을 변주시킴으로써 관상의 내적 리듬인 ‘중심의 고요와 주변의 미세한 움직임’을 음향적으로 구체화할 수 있기 때문이다. 이러한 기술적 정합성을 바탕으로 본 연구는 물리적 시간을 넘어선 관상적 시간성을 Jitter를 통한 실시간 시각적 패턴으로 확장하며, 관객이 소리 내부의 관계 구조를 공감각적으로 체험할 수 있는 환경을 구축한다. 결과적으로 본 연구에서 관상은 특정 종교적 실천을 재현하는 대상에 머물지 않고 음향의 지속성, 미세한 교란, 비단선적 흐름을 규정하는 설계 지침으로 작동하며, 이는 관상의 내적 질서를 현대 멀티미디어 환경의 논리로 변안해내는 미학적 실험의 과정이 된다.

2. 관상의 시간성 분석

관상적 기도에서 중요한 요소는 외부의 객관적 시간 흐름과 분리된 내적 시간 경험의 재구성이다. 가톨릭 교회 교리서¹¹⁾ 2709-2719항은 관상을 하느님 앞에 침묵 속에서 머무는 기도의 형태로 설명하면서, 이를 감각 활동의 단순한 정지가 아니라 고요 속에서 내적 주의와 인식이 더욱 섬세해지는 상태로 규정한다. 이러한 내면의 섬세한 주의 집중은 기도를 정서적 몰입 이상의 질적인 차원으로 이끌며, 토마스 머턴(Thomas Merton, 1915-1968)¹²⁾이 분석한 바와 같이 기도의 깊이에 따라 시간이 부드럽게 확장되거나 압축되는 고유한 시간 구조를 낳는다.

토마스 머턴은 그의 관상 관련 저술에서 이러한 상태를 내면의 시간이 기도의 깊이에 따라 부드럽게 확장되거나 압축되는 경험으로 분석하며¹³⁾, 이는 단순한 심리적 착각이 아니라 관상 기도 고유의 시간 구조라고 설명한다.

또한 아빌라의 테레사(Teresa de Cepeda y Ahumada, 1515-1582)¹⁴⁾는 「영혼의 성」(1588)(*Interior Castle* 1588)에서 관상의 단계를 서술하며, 중심은 안정된 고요함을 유지하는 반면 그 주변에서는 섬세한 움직임과 변화를 동반하는 층위적 경험이 지속된다고 묘사한다. 이러한 서술들은 관상적 기도 안에서 시간성이 균질하게 흐르지 않고, 중심과 주변의 상이한 밀도를 지닌 구조로 재편됨을 시사한다.

11) 가톨릭 교회의 교의와 신앙 실천을 체계적으로 정리한 공식 문헌으로, 2709-2719항은 관상 기도의 본질과 그 내적 구조를 설명한다.

12) 20세기 미국의 트라피스트 수도자이자 영성 신학자로, 관상과 내적 침묵, 인간의 내적 시간 구조에 관한 저술을 통해 현대 가톨릭 영성 이해에 큰 영향을 미쳤다.

13) Thomas Merton, <새 명상의 씨> (가톨릭출판사, 2023)에 반복적으로 나타나는 논의를 개별 문장의 직접 인용이 아닌 구조적 요약의 방식으로 정리한 것이다.

14) 16세기 스페인의 가톨릭 성녀이자 카르멜회 개혁자이며, 관상 기도의 단계와 내적 성체(*Interior Castle*) 모델을 통해 영적 성장의 구조를 상세히 기술한 인물이다.

이러한 문헌적 전통을 바탕으로 관상의 시간성은 세 가지 핵심 특징으로 정리할 수 있다. 첫째, 관상의 시간은 물리적 시간(chronos)¹⁵⁾과 다른 방식으로 작동하는 느린 내적 흐름을 가진다. 관상 상태에서는 짧은 순간이 길게 느껴지거나, 반대로 긴 시간이 짧게 체감되는 등, 시간의 감각이 비대칭적으로 흔들린다. 중요한 것은 이 변화가 감성적 몰입에서 비롯되는 것이 아니라 내면의 고요 속에서 미세한 감각의 차이를 더 선명하게 인식하는 데서 발생한다는 점이다. 둘째, 관상적 시간은 중심성과 변동성이 동시에 유지되는 구조를 지닌다. 즉, 마음의 중심은 안정된 상태를 유지하지만, 주변에서는 다양한 감정·감각·생각이 작은 진동처럼 지나간다. 이러한 중심 및 주변 구조는 단일한 안정성과 미세한 변화를 동시에 수용하며, 관상의 깊이에 따라 더욱 미묘한 층위로 나뉜다. 셋째, 관상에서의 시간은 선형적 흐름이 아닌 비단선적이며 층위화된 경험으로 작동한다. 기도 과정에서 체험자는 고요함, 집중, 미세한 움직임, 다시 고요함의 반복 등을 비선형적으로 오간다. 이 흐름은 사건의 연속이 아니라 층위적 질서가 겹쳐지는 방식으로 전개되며, 이는 음악적 시간 구조에도 직접적으로 적용 가능한 개념적 모델을 제공한다. 본 연구는 이러한 관상의 시간성을 멀티채널 FM 신디사이저 설계의 구조적 원리로 활용한다. 단일 캐리어(carrier)¹⁶⁾는 관상의 중심적 안정성을 모델링하고, 다수의 모듈레이터(modulator)¹⁷⁾는 서로 다른 속도와 위상¹⁸⁾으로 작동하며 주변적 움직임을 재현한다. 이러한 구조는

15) 고대 그리스의 측정 가능한 '선형적 물리 시간'을 의미한다. 반면 kairos는 시간의 양적 흐름이 아닌 의미와 깊이가 집중된 '질적 순간'을 뜻한다. 관상적 기도는 물리적 chronos를 넘어 내면의 kairos적 경험으로 전이되는 특성을 지닌다.

16) FM 합성에서 캐리어는 최종 출력 신호의 기본 주파수를 형성하는 오퍼레이터로, 전체 소리의 중심적 안정성을 결정하는 역할을 한다.

17) FM 합성에서 변조자는 캐리어의 주파수 또는 위상을 변화시켜 추가적인 배음 구조와 음색적 변화를 생성하는 오퍼레이터를 의미한다.

18) 위상은 파형의 주기 내 상대적 위치를 나타내는 개념으로, FM 및 PM 합성에서 변조 신호가 위상에 가하는 변화를 통해 음색 변화가 발생한다.

관상의 내적 시간성인 고요 속의 미세한 변화, 중심과 변동의 공존, 비단선적 흐름을 음향적 질서로 치환하는 데 적합한 방식이다. 결과적으로 관상의 시간성 분석은 FM 구조 설계의 개념적 기반을 제공하며, 작품 <Paschal Resonance>의 미학적 구조를 해석하는 기준으로 기능한다.

<표-1> 관상의 구조적 요소와 FM합성 요소의 구조적 치환에 관한 표

관상의 영적 구조	FM합성 치환 요소	치환의 이유
중심의 고요/안정	단일 캐리어	구조적 안정성과 통일성 부여
주변의 미세한 움직임	다중 모듈레이터의 위상 및 속도 차	내적 집중 속의 미세한 의식 흐름 묘사
느린 내적 시간성	긴 엔벨로프 지정	물리적 시간의 흐름을 탈피하여 질적 깊이를 체감하게 하는 내적 몰입 유도
비단선적 시간성	비선형적 모듈레이션 지수 변화	물리적 시간을 넘어선 감각의 확장
층위적 시간 구조	멀티채널, 독립 위상 흐름	사건의 연속이 아닌 여러 차원의 질서가 중첩되는 비단선적 체험의 공간적 재현
내적 집중	1~16 배음으로의 제한으로 음색의 명료성 확보	복잡함 속에서도 본질적 질서를 잃지 않는 지각적 명료성과 정신적 질서 구현
고요 속의 미세한 움직임	오실레이터 드리프트 로직	정지된 음향이 아닌 끊임없이 변동하는 생명력 있는 기도의 내적 진동 표현

3. FM합성 구조 분석

본 장에서는 본 연구자가 M4L(Max for Live)¹⁹⁾ 환경에서 새롭게 설계한 ‘멀티채널 폴리모듈레이션 FM(multi channel poly modulation FM)’ 구조를 이해하기 위해, 그 전제가 되는 FM합성의 핵심 원리를 간단히 정리한다. 본 연구의 FM합성 알고리즘은 기존 상업용 FM 신디사이저의 고정된 알고리즘을 차용하지 않고, 관상의 구조적 특성을 기술적 모델로 삼아 오실레이터 간의 변조 흐름을 독자적으로 재구성한 형태이다. 따라서 아래의 FM합성 개념 정리는 일반적인 FM합성 원리를 소개하기 위한 것이 아니라, 이후 제시될 멀티채널 비동기 변조 구조의 작동 원리를 설명하기 위한 ‘기초 모델’로 기능한다.

1) FM합성의 기본 원리

FM합성은 한 오실레이터의 진동을 다른 오실레이터의 주파수에 직접 변조함으로써 새로운 스펙트럼을 생성하는 방식이다. 변조가 적용되지 않은 상태에서 캐리어(carrier)는 단일 주파수의 정현파(sine wave)를 출력하지만, 모듈레이터(modulator)의 신호가 주입되면 캐리어의 주파수가 주기적으로 흔들리며 그 결과로 사이드밴드(sideband)²⁰⁾가 발생한다. 사이드밴드는 캐리어 주파수를 기준으로 상하 방향에 나타나는

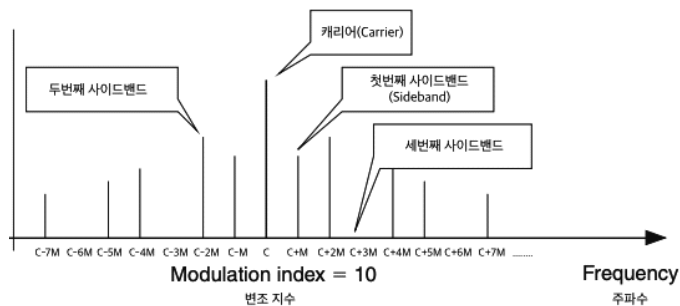
19) Ableton Live 환경 안에서 Max 패치를 직접 제작·편집하여 오디오, MIDI, 시각화 모듈 등을 확장할 수 있도록 하는 통합 플랫폼이다. 사용자는 Max의 시각적 프로그래밍 도구를 Live의 트랙, 클립, 장치 체계에 연결해 맞춤형 신디사이저, 이펙터, 제어 인터페이스 등을 구축할 수 있다. Live와 Max가 실시간으로 양방향 통신하기 때문에, 작곡·공연·시각화 시스템을 사용자 정의 구조로 설계하는 데 널리 활용된다.

20) 변조 과정에서 캐리어 주파수 주변에 생성되는 합과 차의 주파수 성분들. 이 성분들의 수와 진폭에 따라 소리의 음색적 복잡도와 스펙트럼 밀도가 결정됨.

부가적 주파수 성분으로, 변조 지수(modulation index)의 증가에 따라 그 수와 강도가 점진적으로 확대된다. 이 확장은 단순히 고역 성분이 증가하는 감산 합성의 필터 개방과는 다르게, 캐리어보다 높은 주파수 뿐 아니라 더 낮은 주파수 영역에도 동시에 새로운 성분이 생성되는 양방향적 분포를 특징으로 한다.

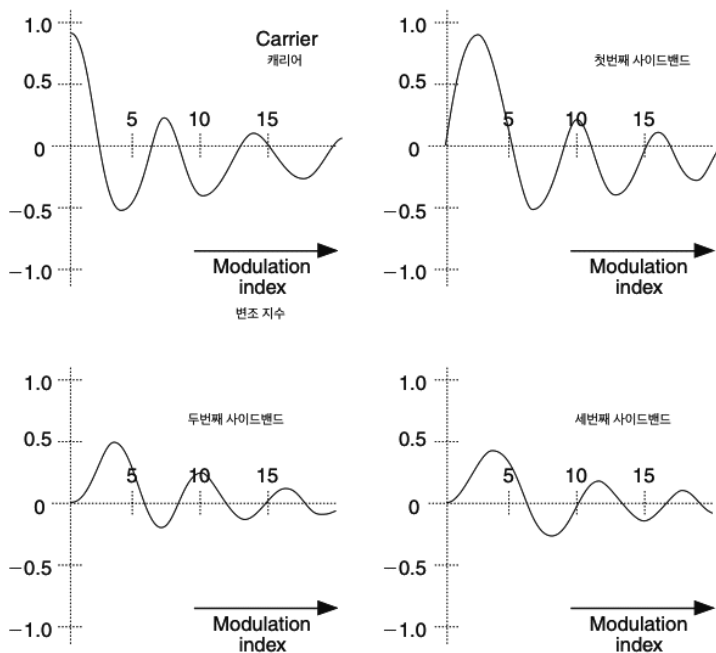
2) 사이드밴드 분포와 비선형성

FM 변조가 이루어지면 캐리어 주파수 c 는 모듈레이터 주파수 m 의 주기적 진동에 의해 흔들리며, 그 결과 출력 스펙트럼은 다음 [그림-1]과 같은 형태로 확장된다. 이때 각 성분의 세기는 [그림-2]의 베셀 함수(Bessel Function)에 의해 배분되며, 변조 지수(modulation index)는 이 베셀 계수를 변화시키는 핵심 변수이다. 변조 지수가 증가할수록 더 많은 사이드밴드가 활성화되며, 음색은 보다 복잡하고 밀도 높은 스펙트럼을 갖는다. 이 과정은 비선형적이기 때문에 변조 지수가 아주 조금만 변해도 전체 배음 구조가 크게 흔들릴 수 있으며, FM합성에서는 이러한 미세한 파라미터 변화가 음색 조직의 근본적 변화를 유발한다.



[그림-1] FM합성의 출력 주파수 스펙트럼²¹⁾

21) Martin Russ, *Sound Synthesis and Sampling*, (Routledge, 2008), p.261



[그림-2] FM합성 변조지수에 따른 사이드밴드의 진폭변화²²⁾

3) 주파수 비율에 의한 스펙트럼 구조 결정

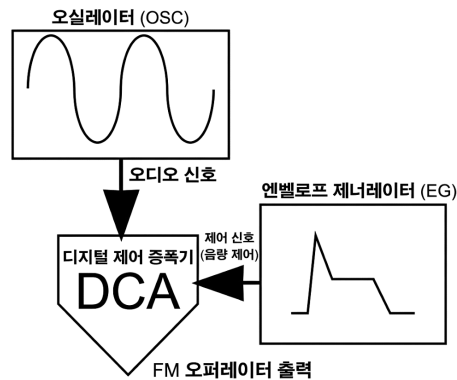
캐리어와 모듈레이터의 주파수 비율은 스펙트럼의 성격을 결정하는 또 하나의 중심 요소이다. 두 주파수가 정수비(integer ratio)를 이룰 경우 생성되는 스펙트럼은 조화적(harmonic) 구조를 지니며, 기본적인 파형(사각파, 톱니파 등)과 유사한 배음 구성을 형성한다. 반대로 비정수비(non-integer ratio)에서는 종(bell tone)이나 금속성 음색(metallic timbre)처럼 비조화적(inharmonic) 구조가 나타나고, 미세한 디튠(detune) 관계에서는 느린 맥놀이(beating)와 미세한 음정 변동이 생긴다. 따

22) M.Russ, *Sound Synthesis and Sampling*, (Routledge, 2008), p.261,

라서 FM합성의 음향적 특성은 (1)캐리어의 중심 주파수, (2)모듈레이터의 주파수 비율, (3)변조 지수라는 세 요소의 상호작용에 의해 구성된다.

4) 오퍼레이터 기반의 FM 합성 구조

FM합성의 내부 구조는 일반적으로 오퍼레이터(operator)라 불리는 단위 모듈을 기반으로 한다. 각 오퍼레이터는 [그림-3]과 같이 오실레이터, 디지털 증폭 제어부(DCA), 그리고 시간 변화를 조절하는 엔벨로프 제네레이터(envelope generator)로 구성된다. 이를 조합하여 하나의 캐리어에 여러 개의 모듈레이터가 연결되거나, 여러 오퍼레이터가 층위적으로 결합된 복합 FM 구조가 형성될 수 있다. 이러한 구조적 유연성 덕분에 FM은 적은 수의 파라미터만으로도 매우 복잡한 시간적·스펙트럼적 변화를 설계할 수 있는 합성 방식으로 자리 잡았다.



[그림-3] 오퍼레이터의 구조²³⁾

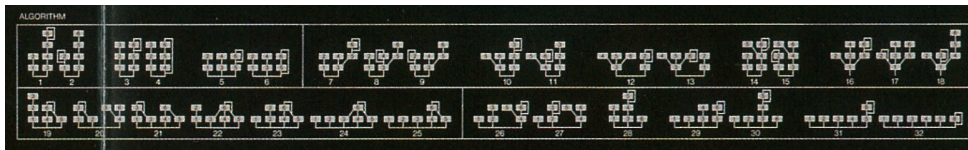
23) M.Russ, *Sound Synthesis and Sampling*, (Routledge, 2008), p.268

5) 기존 FM 합성 시스템의 구조적 한계

기존 FM 신디사이저는 오퍼레이터 간의 연결 방식(알고리즘)을 통해 음색을 설계하는 구조를 가진다. 그러나 이러한 구조는 본 연구에서 구현하고자 하는 멀티채널·비동기·다층적 변조 흐름을 기술적으로 수용하기 어렵다. 본 절에서는 기존 FM 합성 시스템이 갖는 구조적 제약을 네 가지 측면에서 정리한다. 첫째, 운용 가능한 오퍼레이터 연결 방식의 고정성이다. [그림-4]의 Yamaha DX7을 예로 들면, [그림-5]의 32개 알고리즘은 캐리어-모듈레이터 간의 신호 흐름을 미리 정의한 고정적 구조이며, 사용자는 이 연결 구조 자체를 재설계할 수 없다.



[그림-4] Yamaha의 DX7²⁴⁾



[그림-5] DX7의 알고리즘²⁵⁾

24) *DX7 catalog* (Yamaha, 1983) p.3~4

25) *DX7 catalog* (Yamaha, 1983) p.3~4

이는 오퍼레이터 간의 위계나 변조 흐름을 세밀하게 제어해야 하는 본 연구의 목적인 “3개의 독립 모듈레이터가 서로 다른 시간·주파수 경로를 따라 단일 캐리어를 중심으로 변조하는 구조”와 근본적으로 충돌한다. 기존 FM 합성 알고리즘은 병렬·직렬·피드백 구조의 조합을 제공하지만, 모듈레이터마다 서로 다른 외부 입력(MIDI 채널²⁶⁾, CC²⁷⁾, 독립 드리프트)을 부여하는 설계는 구조적으로 불가능하다. 전통적 FM합성 엔진에서 모듈레이터는 동일한 키보드 트래킹, 동일한 노트이벤트, 동일한 전역 피치·시간 변수를 공유하도록 설계되어 있으며, 이로 인해 모듈레이터별로 서로 다른 MIDI 채널에서 피치(pitch)를 수신하거나 각기 다른 엔벨로프(envelope) 및 노트 이벤트를 적용하는 운용은 허용되지 않는다. 또한 대부분의 시스템에서는 CC11: expression과 같은 외부 컨트롤에 의해 모듈레이터별 변조 지수를 독립적으로 결정하는 구조를 제공하지 않으며, 좌·우 채널 역시 분리되지 않은 단일 신호 경로를 따른다. 반면 본 연구에서는 각 모듈레이터가 서로 다른 MIDI 채널에서 피치를 받고, 서로 다른 엔벨로프 및 노트이벤트가 적용되며, 서로 다른 CC11: expression에 의해 변조 지수가 결정되고, 좌/우 채널이 서로 다른 micro drift로 분화되는 완전한 독립 신호 체계를 요구한다. 이러한 요구는 기존 FM합성 시스템의 설계 전제와 양립할 수 없다. 더 나아가 대부분의 상업용 FM합성은 오퍼레이터 내부를 모

26) MIDI 채널은 단일 MIDI 포트 내에서 최대 16개의 독립적인 제어 흐름을 구분하기 위한 논리적 채널로, 각 채널은 서로 다른 노트 이벤트, 피치 정보, 컨트롤 메시지를 독립적으로 전달할 수 있다. 본 연구에서는 각 모듈레이터가 서로 다른 MIDI 채널을 통해 피치를 수신함으로써, 동일한 키보드 입력이나 글로벌 이벤트에 종속되지 않는 독립적인 시간·주파수 거동을 구현한다.

27) CC(Control Change)는 MIDI 프로토콜에서 연속적인 제어 값을 전달하기 위한 메시지로, 연주 중 실시간 파라미터 변화를 제어하는 데 사용된다. 본 연구에서는 CC 11: expression을 포함한 CC 메시지를 각 모듈레이터의 변조 지수 및 내부 파라미터 제어에 활용하여, 노트 이벤트와 분리된 연속적 제어 흐름을 형성하고 모듈레이터 간 비동기적 변화를 가능하게 한다.

노 신호로 계산한 뒤 최종 출력단에서만 페닝(panning)²⁸⁾을 적용하는 구조를 따른다. 이로 인해 오퍼레이터 내부의 스테레오 위상 차이, 드리프트 차이, 비동기 변조는 구현할 수 없으며, 본 연구에서 구현한 각 오퍼레이터의 좌·우 별도 미세 주파수 드리프트는 기존 FM합성 구조에서는 근본적으로 불가능한 방식이다. 또한 본 연구는 모든 오퍼레이터의 주파수 비율을 1 - 16 정수배에 고정하여 스펙트럼 확산을 방지하고 중심성을 유지하려는 목적을 가지지만, 대부분의 FM 신디사이저에서는 정수배음만 허용하거나 특정 비율(ratio)만을 고정적으로 강제하는 알고리즘적 구조를 제공하지 않는다. 이는 Max 기반의 완전한 사용자 정의 알고리즘 환경이 아니면 구현할 수 없는 제약이다. 결론적으로 기존 FM합성 시스템은 오퍼레이터 간 독립 시간 흐름, 스테레오 오실레이터 기반 비동기 드리프트, 외부 MIDI 채널 기반 다층 모듈레이션, 정수배음 제한 알고리즘 등의 설계를 기술적으로 수용할 수 없으며, 이에 따라 본 연구는 전통적 FM 구조를 차용하는 대신 Max/MS P 기반의 사용자 정의 FM합성 알고리즘, 즉 “멀티채널 폴리모듈레이션 FM”을 별도로 설계해야 했다.

28) 오디오 신호를 좌·우 스테레오 채널 사이에 분배하여 공간적 위치감을 형성하는 처리 방식으로, 일반적으로는 모노 신호를 기반으로 출력 단계에서 채널 간 레벨 차이를 조절하는 방식으로 구현된다. 이 과정은 신호의 내부 위상이나 주파수 구조를 변화시키지 않으며, 공간적 배치만을 제어하는 출력 단계의 처리에 해당한다.

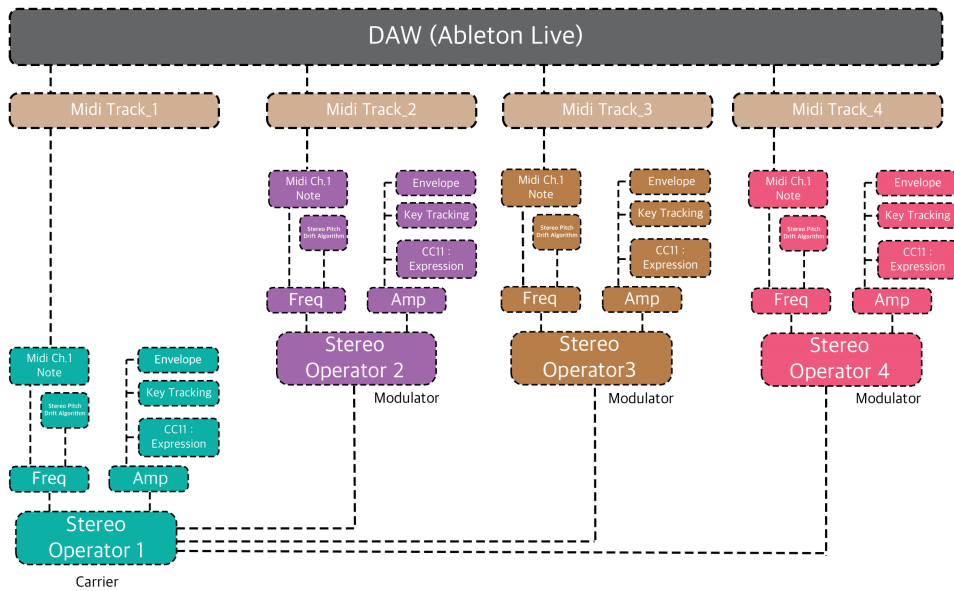
4. 멀티채널 폴리모듈레이션 FM 시스템의 설계

본 장에서는 앞선 장에서 정리한 FM합성의 기본 원리를 기반으로, 본 연구자가 M4L 환경에서 새롭게 설계한 ‘멀티채널 폴리모듈레이션 FM’ 합성 시스템의 구체적 구조를 제시한다. 이 시스템은 단일 캐리어를 중심으로 다수의 모듈레이터가 서로 다른 MIDI 채널로부터 독립적인 주파수·진폭·표현 데이터를 수신하는 비동기적 병렬 구조로 FM합성 알고리즘을 새롭게 구성하였다. 본 시스템은 전통적 FM 신디사이저를 확장하는 데 목적이 있는 것이 아니라, 관상의 구조의 “안정된 중심”과 “주변의 미세하고 비동기적인 움직임”을 음향적으로 재현하기 위한 설계적 해법을 제안하는 데에 목적을 둔다. 따라서 본 장에서는 캐리어와 모듈레이터의 관계, 주파수 비율의 제어, 모듈레이터의 독립채널화, 스테레오 오퍼레이터 구조, 오실레이터 드리프트 알고리즘, 멀티채널 분산 전략 등 본 연구만의 FM 알고리즘을 구성하는 기술적 요소를 단계적으로 설명한다.

1) 신호 흐름 설계

[그림-6]의 다이어그램은 Ableton Live²⁹⁾를 상위 제어 계층으로 두고, 네 개의 독립적인 MIDI 입력 스트림이 각기 다른 FM 오퍼레이터(operator 1-4)에 매핑되는 시스템 아키텍처를 나타낸다.

각 오퍼레이터는 주파수 제어, 진폭 제어, 키 트래킹(key Tracking), 그리고 CC11: expression에 해당하는 외부 제어 신호를 독립적으로 수신하며, 이는 각 모듈레이터가 서로 상관되지 않은 파라미터 흐름을 갖도록 설계된 구조이다.



[그림-6] 멀티채널 폴리 모듈레이션 FM합성의 시그널 흐름 구조

29) 독일의 음악 소프트웨어 기업 Ableton AG가 개발한 디지털 오디오 워크스테이션(DAW)으로, 실시간 퍼포먼스와 제작 환경을 통합하도록 설계되었다. Ableton AG는 Live와 함께 다양한 가상 악기·사운드 라이브러리, 그리고 전용 하드웨어 컨트롤러인 Push 시리즈를 제작·유통한다.

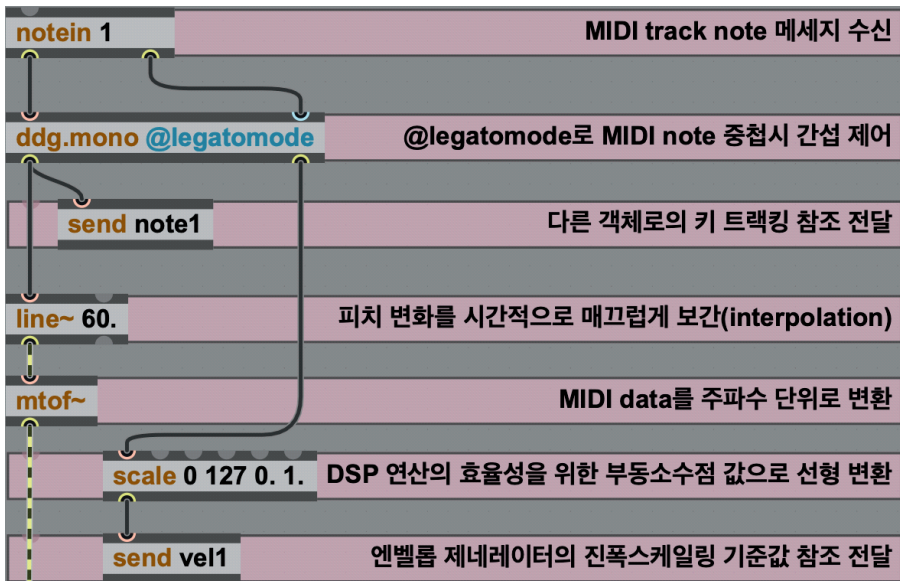
스테레오 오퍼레이터(stereo operator) 1은 캐리어로 기능하며, 오퍼레이터 2, 3, 4는 병렬(parallel) 변조 경로로 연결된 모듈레이터로 작동한다. 각 모듈레이터는 자체적인 주파수 제어 루틴과 진폭 엔벨로프를 통해 캐리어에 주입되는 변조 신호의 시간적·스펙트럼적 특성을 결정한다. 네 오퍼레이터 모두 **mc.cycle~**객체 기반의 스테레오 오실레이터 구조를 사용하여 좌·우 채널이 상호 독립적인 위상·주파수 드리프트를 갖도록 구성되어 있으며, 이는 채널 간 디코릴레이션(decorrelation)³⁰⁾을 유도하여 공간적 스펙트럼 밀도를 확장하는 효과를 제공한다. 본 구조는 단일 내부 FM합성 엔진에 모든 오퍼레이터가 종속되는 상업용 FM합성과 달리, 각 오퍼레이터가 독립된 시간 도메인·주파수 도메인·표현 제어 스트림을 활용하는 다중 입력 기반 FM합성 아키텍처임을 의미한다. 다이어그램은 이후 장에서 상세히 서술될 신호 라우팅, 변조 지수 제어, 파라미터 매핑, 멀티채널 분산 전략의 상위 구조적 흐름을 제공한다.

2) MIDI 이벤트 프로세싱 계층 설계

[그림-7]의 캐리어 오퍼레이터의 최상단에 위치한 MIDI 이벤트 프로세싱 계층은 Ableton Live로부터 유입되는 MIDI 데이터를 DSP 신호 처리에 적합한 형태로 변환하는 전처리(pre-processing) 과정을 담당한다. 이 단계의 핵심 목표는 노트 번호(pitch)와 벨로시티(velocity) 데이터를 개별적인 제어 경로로 분리하고, 이를 주파수 변조 및 진폭 제어 시스템이 즉각적으로 활용할 수 있도록 정규화(normalization)하는 데

30) 신호 간의 유사성을 시간 및 위상 영역에서 분산시켜 채널 간의 결합(coherence)을 약화시키는 과정을 의미한다. 이러한 처리는 청각적 이미지의 폭을 넓히는 동시에, 특정 주파수의 공진이나 왜곡을 완화하여 보다 입체적이고 분산된 텍스처를 구현하는 데 필수적이다.

있다. 우선, 신호의 진입점인 **notein 1** 객체는 MIDI 채널 1의 모든 노트 메시지를 수신한다. 여기서 추출된 피치 정보는 즉시 **ddg.mono @legatomode** 객체로 전달되는데, 이는 단성(monophonic) 연주 시 발생할 수 있는 신호 간섭을 제어하기 위함이다. **ddg.mono** 객체는 인접한 노트 간의 불필요한 온/오프(on/off) 신호 중첩을 방지하고 레가토(legato) 주법을 매끄럽게 처리함으로써, 물리적인 연주 이벤트를 DSP가 해석 가능한 ‘유효한 피치 흐름’으로 1차 정제한다.



[그림-7] MIDI 이벤트 프로세싱 계층 패치 구조

ddg.mono 객체를 거친 피치 데이터는 두 가지 경로로 분기된다. 첫 번째 경로는 **send note1**을 통해 전역으로 전송되어, 키 트래킹이나 시각화 모듈 등 피치 정보가 요구되는 다른 서브 패치들에서 참조된다. 두 번째 경로는 오디오 신호 처리를 위한 직접적인 경로로, **line~** 객체로 전달된다. 미디 노트 번호 값은 **line~** 객체를 통과하며 오디오 레이

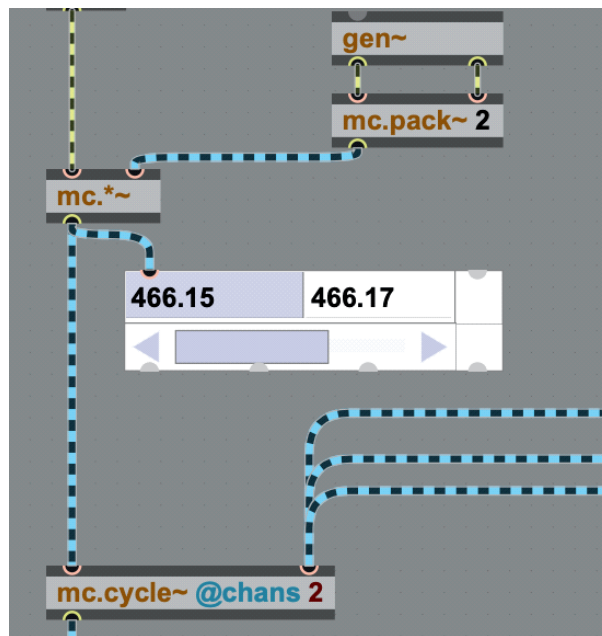
트(audio rate)의 부드러운 램프(ramp)³¹⁾ 신호로 보간(interpolation)되며 포르타멘토(portamento)를 발생시킨다. 이는 후단에 위치한 **mtof~** 객체를 거쳐 주파수(Hz) 단위로 변환될 준비를 마친다. 즉, 이 과정은 이산적인(discrete) MIDI 이벤트를 시간적으로 연속성을 갖는 제어 신호로 전환하는 결정적 단계라 할 수 있다. 동시에, **notein** 1객체에서 분리된 벨로시티 정보는 **scale** 0 127 0. 1.객체를 통해 재매핑된다. 기존 0-127 범위의 정수 데이터는 DSP 연산의 효율성을 위해 0.0-1.0 범위의 부동소수점 값으로 선형 변환되며, 이 정규화된 값은 **send** vel1 객체를 통해 전달된다. 하위 모듈의 **receive** vel1객체는 이 값을 수신하여 엔벨로프 제네레이터 객체인 **live.adsr~**객체의 피크 레벨 설정 및 진폭 스케일링의 기준값으로 활용한다. 이러한 설계는 벨로시티가 단순한 볼륨 조절을 넘어, 합성음의 시간적 응답 특성과 음색의 다이내믹스를 결정짓는 전역 변수(global variable)로 기능하게 한다.

종합하면, 이 계층은 외부의 연주 정보를 하위 합성 엔진이 일관성 있게 처리할 수 있도록 중재하는 입력 인터페이스 역할을 수행한다. 이벤트 기반의 데이터를 신호 기반으로 전환하는 이 과정은 시스템의 시간적 안정성과 정밀도를 보장하는 기술적 토대인 동시에, 이산적인(discrete) MIDI 데이터를 매끄럽게 연결하여 관상 기도가 지닌 ‘끊어짐 없는 내적 흐름’을 음향적 기초로서 확보하기 위한 장치가 된다.

31) 이산적인 제어 값을 일정한 시간 동안 연속적으로 변화하는 신호로 보간하는 방식으로, **line~** 객체에서는 MIDI 노트 값의 급격한 변화를 오디오 레이트의 부드러운 피치 변화로 변환하여 클릭을 방지하고 포르타멘토를 구현하는 데 사용된다.

3) 스테레오 오실레이터 드리프트 프로세싱 설계

변환된 주파수는 [그림-8]과 같이 **gen~** 패치와 함께 **mc.*~** 객체를 통해 곱해져 멀티채널 신호로 확장된다. **gen~** 패치는 좌·우 두 채널에 서로 다른 주파수 드리프트를 생성하기 위한 알고리즘으로 구성되어 있으며, **gen~**의 두 출력 신호는 **mc.pack~ 2** 객체를 통해 좌·우 멀티채널 벡터로 정렬된다. 정렬된 신호는 **mc.cycle~@chans 2** 객체의 프리퀀시 인렛(frequency inlet)에 입력되어 스테레오 오실레이터의 각 채널이 독립적으로 서로 다른 미세 주파수를 갖도록 한다.



[그림-8] 오실레이터 드리프트 처리 패치 구조

이때 모듈레이터로 사용되어지는 오퍼레이터2-4에서 전달되는 변조 신호는 **mc.cycle~** 객체의 페이즈 인렛(phase inlet)을 통해 주입되며,

이는 본 연구가 FM합성을 PM(Phase Modulation)³²⁾합성 기반으로 구현하여 높은 스펙트럼 안정성과 예측 가능한 변조 구조를 확보하기 위함이다. 최종적으로 `mc.cycle~`객체의 출력은 `mc.stereo~`, `mc.clip~`객체 등의 후처리 단계를 거쳐 플러그인 오디오 출력으로 전달된다. `gen~` 내부 알고리즘은 [그림-9]과 같이 좌·우 채널 각각에 독립적인 주파수 드리프트를 생성하도록 설계되었다.

```

CodeBox
1 // --- 파라미터 정의 (대문자 'P'ara'm' 사용)
2 Param slide1_ms(500, min=1, max=5000); // 짧은 슬라이드 시간
3 Param slide2_ms(800, min=1, max=5000); // 긴 슬라이드 시간
4 Param depth_cents(10, min=0, max=100); // 드리프트 깊이
5
6 // --- 샘플 수 변환 ---
7 // 파라미터(ms)를 gen~ 내부의 samplerate 변수를 이용해 샘플
8 s1_samps = (slide1_ms / 1000.) * samplerate;
9 s2_samps = (slide2_ms / 1000.) * samplerate;
10
11 // --- 채널 1 (왼쪽) 로직
12 n1 = noise(); // 채널 1 노이즈
13 slide1a = slide(n1, s1_samps, s1_samps);
14 slide1b = slide(n1, s2_samps, s2_samps);
15 sum1 = slide1a + slide1b;
16 cents1 = sum1 * depth_cents; // 파라미터로 깊이
17 ratio1 = pow(2, cents1 / 1200); // 센트 -> 주파수 비율
18
19 // --- 채널 2 (오른쪽) 로직
20 n2 = noise(); // 채널 2 노이즈
21 slide2a = slide(n2, s1_samps, s1_samps);
22 slide2b = slide(n2, s2_samps, s2_samps);
23 sum2 = slide2a + slide2b;
24 cents2 = sum2 * depth_cents;
25 ratio2 = pow(2, cents2 / 1200);
26
27 // --- 최종 출력 ---
28 out1 = ratio1; // 채널 1 비율
29 out2 = ratio2; // 채널 2 비율
30

```

[그림-9] 스테레오 오실레이터 피치 드리프트 알고리즘 코드 구조

32) FM합성은 이론적으로 PM합성과 동일한 결과를 낼 수 있지만, 실제 디지털 구현에서는 주파수 누적 오차, 변조 지수 변화에 따른 스펙트럼 편차, 샘플링 기반의 위상 불안정성 등이 발생하기 쉽다. 반면 PM 방식은 변조 신호가 직접 위상에 적용되기 때문에 출력 스펙트럼이 변조 지수와 선형적으로 대응하며, 높은 시간 해상도에서도 안정적인 스펙트럼 구조를 유지한다. 본 연구가 PM 기반 FM 구조를 채택한 이유는 이러한 특성들이 관상의 중심적 안정성과 주변의 미세 변동을 재현하는 데 더 적합하기 때문이다.

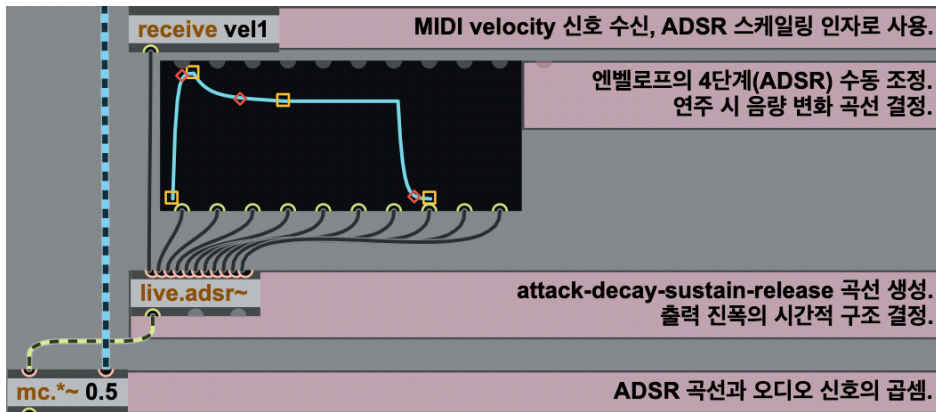
우선 **noise()** 객체는 난수 기반의 변조 원신호를 생성하며, 이는 슬루 제한 객체 **slide()** 객체를 두 단계로 적용하여 서로 다른 속도와 곡률(curvature)을 가진 시간적 흐름을 구성한다. 이러한 이중 슬루 구조는 관상의 시간성이 지닌 “고요한 중심 + 느린 주변 파동”의 이중 구조를 기술적으로 모델링하는 역할을 한다. 두 **slide** 객체의 신호의 합산 결과는 **depth_cents** 객체의 파라미터에 의해 조절되며, 이를 통해 생성된 센트(cents) 단위의 미세한 음정 변화는 $\text{pow}(2, \text{cents}/1200)$ 의 지수 변환을 통해 주파수 비율(ratio)로 치환된다. 최종적으로 **gen~** 패치는 두 채널 각각에 대해 서로 상관되지 않은 두 개의 ratio 스트림을 출력하며, 이는 캐리어 오실레이터의 좌·우 채널의 주파수가 항상 미세하게 서로 다르게 움직이도록 한다. 이와 같은 구조는 단순한 디튠(detune)이나 일반적인 LFO 변조와는 근본적으로 다르다. 주파수의 시간 변화가 두 채널에서 동일한 위상·동기 조건을 공유하지 않기 때문에, 출력 음향은 시간적으로 불규칙한 미세 변동을 지속적으로 생성하며, 이는 스테레오 필드 전반에서 자연스러운 디코릴레이션을 유도한다. 이러한 미시적 불일치는 관상적 시간성에서 강조되는 ‘정지된 중심 내부에 존재하는 지속적인 미세 변화’를 음향적으로 구현하는 핵심 요소이며, 본 연구의 멀티채널 FM합성 시스템이 가지는 가장 중요한 차별적 특성이다.

4) 진폭 신호 흐름 설계

본 단계는 키 트랙킹, 엔벨로프 제네레이터, CC11: expression 데이터를 실시간 오디오 신호 영역에서의 진폭 제어(amplitude modulation)로 변환하는 흐름을 다룬다.

① 엔벨로프 제네레이터

[그림-10]의 패치 블록은 MIDI로부터 전달된 벨로시티 제어 신호를 기반으로, 캐리어 오퍼레이터의 진폭 변화를 결정하는 시간적 엔벨로프를 생성하는 역할을 수행한다.



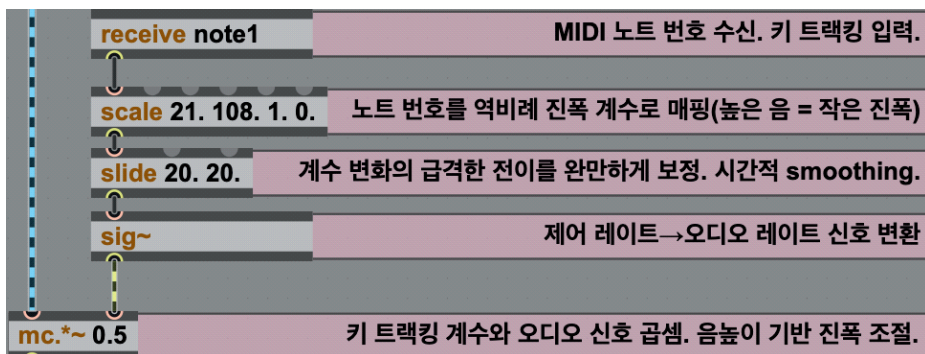
[그림-10] 엔벨로프 제네레이터 패치 구조

먼저 **receive** vel1객체는 상위 이벤트 계층에서 전송된 노멀라이즈된 벨로시티 값을 실시간으로 수신한다. 이 값은 엔벨로프 제너레이터 곡선의 스케일링 인자로 사용되어, 동일한 엔벨로프 구조라도 연주자의 타건 세기에 따라 전체 출력 진폭이 비례적으로 조절되도록 한다. 수신

된 벨로시티는 **live.adsr~** 객체의 첫번째 인렛(inlet)으로 입력되며, 이 객체는 어택(attack) - 디케이(decay) - 서스테인(sustain) - 릴리즈(release)로 구성된 시간적 진폭 곡선을 생성한다. ADSR의 네 단계는 **live.adsrui** 객체의 GUI 형태로 직접 조절 가능하며, 각 파라미터는 음색의 시간적 거동을 다음과 같이 결정한다. 어택은 신호의 초기 상승 속도, 디케이는 첫 안정화까지의 감쇠, 서스테인은 유지 레벨, 릴리즈는 노트 오프 이후의 감쇠 시간을 규정한다. 이렇게 생성된 ADSR 곡선은 오디오 레이트 신호로 출력되며, 이후 캐리어 오퍼레이터의 최종 진폭 제어 단계에서 멀티채널 오디오 신호와 곱셈 연산을 통해 적용된다. 즉, 이 블록은 “연주자 벨로시티 기반의 시간적 진폭 구조”를 형성하여, 캐리어의 발음(dynamic articulation)과 음색의 시간적 밀도를 결정하는 핵심 제어 신호를 담당한다.

② 키 트래킹

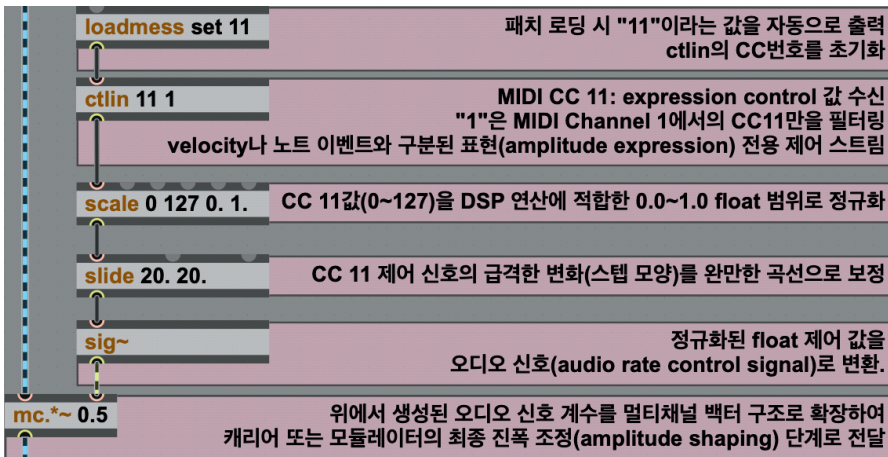
[그림-11]의 패치블록은 입력된 MIDI 노트 번호를 기반으로 캐리어 진폭에 적용되는 키 트래킹 계수를 생성하는 구조이다.



[그림-11] 키 트래킹 패치 구조

먼저 **receive** note1객체는 상위 MIDI 처리 계층에서 전달된 노트 번호를 수신하며, 이 값은 **scale** 0 127 1. 0.객체를 통해 높은 노트 번호일수록 더 낮은 계수를 갖도록 역비례 스케일링된다. 이렇게 정규화된 제어 신호는 **slide** 20. 20.객체를 거치면서 급격한 계수 변화를 완만한 곡선으로 보정하며, 이는 키보드 상의 불규칙한 연주 동작이 진폭 구조에 과도하게 반영되는 것을 방지하는 역할을 한다. **slide**객체의 출력은 **sig~**객체를 통해 오디오 레이트의 제어 신호로 변환되고, 최종적으로 **mc.*~**객체에 입력되어 캐리어 오디오 신호와 곱해진다. 그 결과, 연주되는 음높이에 따라 진폭이 자연스럽게 변조되며, 낮은 음역에서는 상대적으로 넓고 안정된 진폭, 높은 음역에서는 얇고 작아지는 진폭 곡선이 생성된다. 이는 관상적 음향에서 중요한 “주파수 기반의 에너지 분포”를 구현하기 위한 설계적 선택이다.

③ 익스프레션 제어



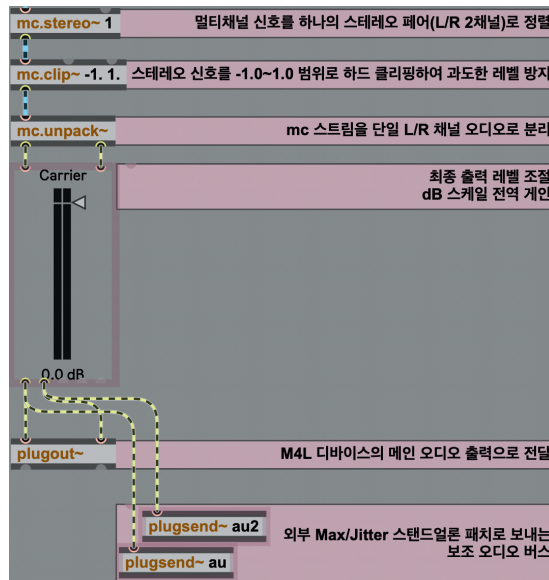
[그림-12] MIDI 익스프레션 제어 패치 구조

[그림-12]의 패치에서 **loadmess** set 11객체는 패치 로딩 시 자동으로 메시지 “11”을 출력하여, 뒤따르는 **ctlin** 11 1객체가 MIDI 채널 1의 CC 번호 11을 감지하도록 초기 조건을 설정한다. 이렇게 설정된 **ctlin** 11 1은 에이블튼 라이브의 미디채널로부터 수신되는 CC11: expression 이벤트를 지속적으로 읽어들이며, 해당 값은 0 - 127 범위의 정수로 출력된다. 이 CC 값은 즉시 **scale** 0 127 0. 1.객체로 전달된다. **scale** 객체는 입력된 0-127 범위를 0.0-1.0 범위의 연속적 소수(float)값으로 선형 변환함으로써, 후속 DSP 단계에서 진폭 계수로 직접 사용할 수 있는 형태로 정규화한다. 그러나 MIDI CC는 스텝 기반 제어값이기 때문에 급격한 값의 변화가 발생할 수 있으며 이는 오디오 클릭을 유발할 수 있다. 이를 방지하기 위해 **scale**객체의 출력은 **slide** 2 0. 20.객체로 전달되어, 입력의 급격한 변화가 20ms 슬루 레이트를 갖는 완만한 곡선으로 변환된다. 이 슬루 필터링 과정은 실시간 연주 시 CC11: expression 신호의 안정성을 높이고, 음향적 표현을 보다 자연스럽게 연속적인 형태로 만들어준다. **slide**객체의 출력은 float 신호이기 때문에 오디오 신호와 직접 연산할 수 없다. 이에 따라 신호는 **sig~**객체로 전달되어 오디오 레이트로 변환된다. **sig~**객체는 입력 float 값을 44.1kHz 또는 그 이상의 샘플레이트에 맞는 오디오 스트림으로 상향 변환(up-sampling)하여, 이후 오디오 신호와의 곱셈 연산이 가능한 제어 신호(signal rate control stream)로 만든다. 변환된 오디오 레이트 제어 신호는 곧바로 **mc.*~**객체로 입력된다. **mc.*~**객체는 멀티채널 슬롯을 갖는 오디오 곱셈(multiply) 연산자이며, 입력된 제어 신호를 멀티채널 벡터 구조로 확장한 뒤, 캐리어 또는 모듈레이터의 오디오 신호와 곱하여 최종 진폭을 제어한다. 이는 곧 CC11:expression 값이 오디오 신호의 실시간 진폭을 직접적으로 조절하는 구조이며, 다채널 FM합성 시스템 내에서 각 오퍼레이터의 최종 출력 레벨을 독립적이고

부드럽게 변화시키는 핵심 제어 경로가 된다. 결과적으로, **loadmess** 객체에서 시작된 초기화 메시지는 **ctlin**을 특정 CC에 고정시키고, **ctlin** → **scale** → **slide** → **sig~** 객체로 이어지는 연속적 변환 과정을 통해 MIDI CC11 데이터는 오디오 레이트의 연속적 진폭 제어 신호로 치환된다. 마지막으로 이 신호는 **mc.*~** 객체에서 오퍼레이터 신호에 직접 곱해져, 표현 기반의 진폭 변조가 스테레오·멀티채널 FM 설계 전체에 안정적으로 반영되도록 한다.

④ 최종 출력단 설계

[그림-13]의 패치블록은 캐리어 오퍼레이터에서 생성된 스테레오 오디오 신호를 최종적으로 정규화하고, 하나는 Ableton Live의 트랙 출력으로, 다른 두 개는 외부 Jitter 패치로 분기시키는 출력 단계에 해당한다.



[그림-13] 최종 출력단 설계 패치 구조

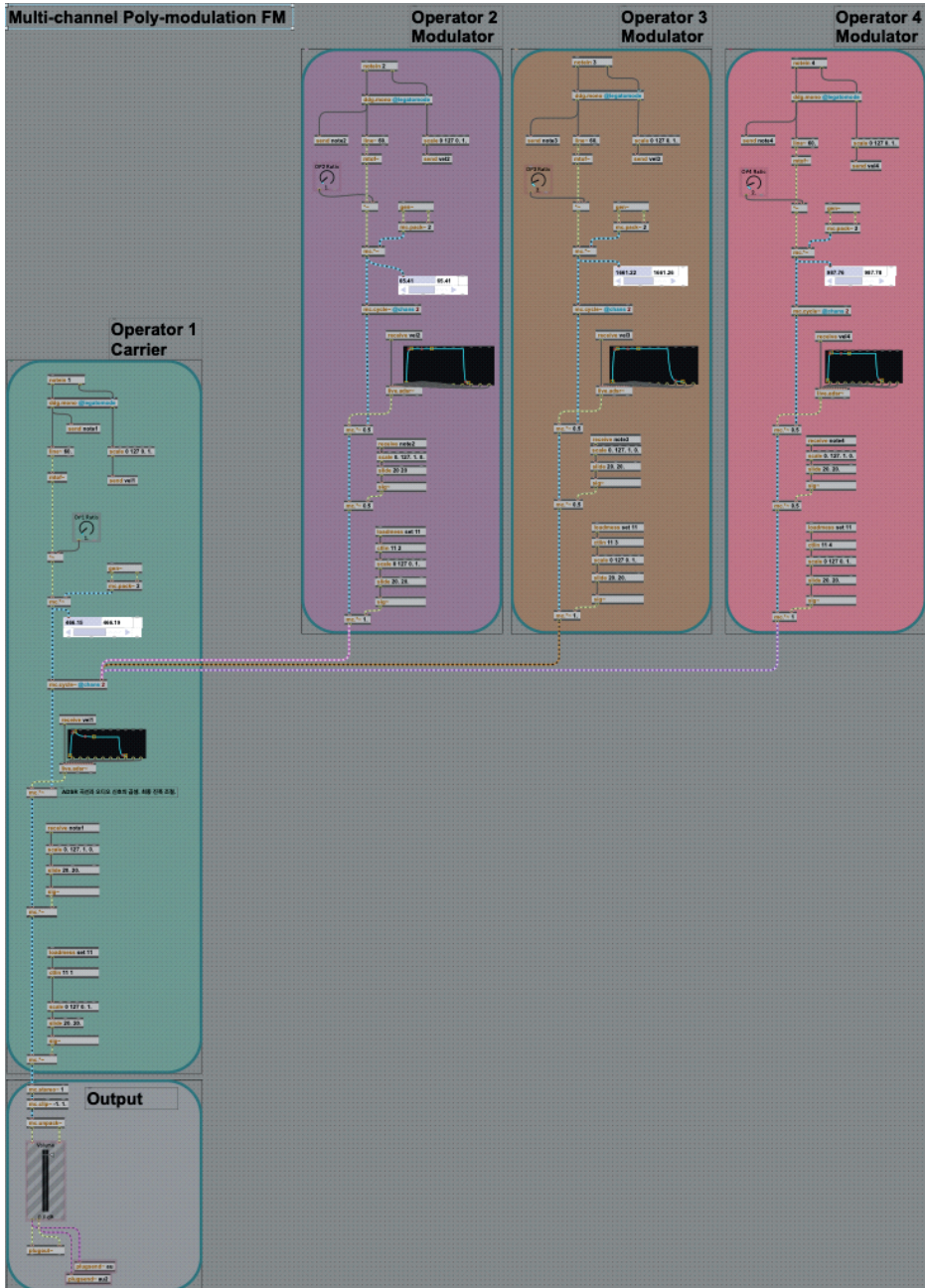
상위 단계에서 전달된 멀티채널 신호는 먼저 **mc.stereo~** 1객체로 들어가는데, 이 객체는 mc 신호를 하나의 스테레오 페어(pair)로 정렬하여 좌·우 2채널 구조로 고정한다. 이어지는 **mc.clip~ -1. 1.**객체는 이 스테레오 신호의 샘플 값을 -1.0부터 1.0 사이로 강제 제한하여, 강한 FM 변조나 여러 변조자의 중첩으로 인해 발생할 수 있는 디지털 클리핑과 내부 오버슈트(overshoot)³³⁾를 사전에 제거한다. 클리핑이 적용된 mc 신호는 **mc.unpack**객체를 통해 두 개의 단일 채널 스트림으로 분리되며, 이 두 스트림은 바로 아래의 볼륨 페이더 객체인 **live.gain~** 객체의 입력으로 전달된다. 볼륨 페이더는 dB 스케일 기반의 최종 출력 레벨을 결정하는 전역 게인 스테이지(gain stage)³⁴⁾로, 사용자가 장치 전체의 음량을 직관적으로 조정할 수 있는 인터페이스 역할을 한다. 페이더의 출력은 다시 세 갈래로 분기되는데, 하나는 **plugout~**객체로 연결되어 M4L 디바이스의 메인 오디오 출력으로 전달되고, 나머지 두 갈래는 **plugsend~ au, plugsend~ au2**객체로 전달되어 별도의 명명된 오디오 버스를 통해 별도의 Max 패치로 전송된다. 이 두 **plugsend~**객체는 Jitter 기반 시각화 패치에서 사용될 오디오 분석용 신호를 공급하는 역할을 하며, 따라서 이 블록 전체는 “스테레오 정규화 → 안전한 레벨 제한 → 최종 볼륨 제어 → DAW 출력과 시각화 시스템으로의 동시 분배”라는 출력 구조를 완성하는 단계라 할 수 있다.

33) 디지털 오디오 신호가 이론적으로 허용된 정규화 범위(예: -1.0~1.0)를 순간적으로 초과하는 현상을 의미한다. 이는 급격한 파형 변화, 또는 샘플 간(inter sample) 보간 과정에서 발생할 수 있으며, 실제 샘플 값은 제한 범위 내에 있더라도 내부 연산이나 D/A 변환 단계에서 클리핑 왜곡을 유발할 수 있다.

34) 오디오 신호 경로에서 신호의 음질이나 스펙트럼 구조를 변화시키지 않고, 전체 레벨만을 증폭 또는 감쇠하기 위해 설정된 구간을 의미한다. 주로 최종 출력 직전에 위치하며, 시스템 전체의 음량을 안전하고 일관되게 제어하는 역할을 한다.

⑤ 멀티채널 오퍼레이터(2-4)의 구조와 시스템 통합

오퍼레이터 2·3·4는 오퍼레이터 1과 동일한 DSP 구조를 공유하며, 출력 경로가 캐리어의 위상 변조를 위한 인렛으로 연결된다는 점만 다르다. 따라서 모듈레이터들은 각기 독립적인 MIDI 입력·엔벨로프·오실레이터 드리프트 알고리즘을 유지하면서도 직접적인 오디오 출력은 생성하지 않고, 캐리어의 위상 변조 신호로만 작동한다. 이러한 구조적 동일성과 기능적 차별성은 전체 시스템의 관상적 시간성을 구성하는 핵심 설계 요소이다. [그림-14]는 완성된 형태의 멀티채널 폴리 모듈레이션 FM합성의 M4L 패치이다. 이와 같이 본 연구의 멀티채널 FM합성 기반 음향 엔진은 관상의 구조인 ‘안정된 중심’과 ‘주변의 미세한 비동기적 변동’을 DSP 수준에서 구현하는 하나의 독립적 시스템으로 설계되었다. 다음 장에서는 동일한 관상적 구조가 실시간 Jitter 기반 시각화 시스템에서는 어떠한 방식으로 구현되는지를 다룬다.



[그림-14] 멀티채널 폴리 모듈레이션 FM의 M4L 패치 구조

5. 비주얼 디자인 시스템 설계

1) 설계 개요

본 장에서 제시하는 비주얼 디자인(visual design) 시스템은 작품의 음향 구조를 직관적으로 해석 가능하게 만드는 가시화 계층(visualization layer)의 설계 원리를 다룬다. 본 연구의 시각화는 멀티채널 폴리모듈레이션 FM합성이 생성하는 미세한 파라미터의 흐름과 스펙트럼 변화를 실시간으로 계측하여 드러내는 데이터의 투명한 투영을 지향한다. 이는 앞서 고찰한 관상의 구조적 원리가 전자음향 시스템 내에서 어떻게 알고리즘적으로 구현되고 있는지 가시화하는 분석적 인터페이스로 작동한다. 즉, 시각적 요소는 음향적 관상이 지닌 질서와 리듬을 공감각적 언어로 번안하여 소리 내부의 관계 구조를 선명하게 드러내는 데 목적이 있다.

① 비주얼 패치의 목적

본 비주얼 패치의 목적은 특정 영적 상태나 내적 감정의 시각적 묘사에 있지 않다. 오히려 관상에서 정의된 “중심의 안정성과 주변의 미세한 변동”이라는 구조적 패턴이 FM합성 시스템 내부에서 어떤 형태로 작동하고 있는지를 시각 신호로 치환하는 데 목적이 있다. 따라서 비주얼은 음향적 과정의 외부적 표현(illustration)이 아니라, FM합성 알고리즘 내부에서 이루어지는 데이터 흐름과 시간적·주파수적 변화를 읽어내는 계측 장치(visual instrumentation)로 기능한다. 이는 음향과 시각을 동일한 상징 체계로 대응시키려는 일반적 사운드에서 비주얼로

의 매핑 방식과 달리, 합성 과정 그 자체의 논리를 드러내는 분석적 목적에 초점을 둔 설계이다.

② 이미지 분리 원칙

본 연구의 비주얼 설계는 음향 합성과 시각화를 구현 층(sonic implementation layer)과 표현 층(visual representation layer)으로 명확히 분리하는 원칙 위에 구축되었다. 첫째, 구현 층은 오퍼레이터 간 변조 구조, 미시적 주파수 드리프트, 변조 지수, 정수배음 비율 등의 DSP 알고리즘적 요소를 통해 관상적 구조를 음향적으로 실현하는 영역이다. 둘째, 표현 층은 이 구현 층에서 생성된 신호인 캐리어·모듈레이터의 진폭, MIDI 노트/벨로시티, 위상 변화, 오실레이터 드리프트 등을 별도의 Jitter 모듈에서 분석하여 시각적 형태로 변환하는 계층이다. 이 분리는 작품이 특정 영적 이미지를 강요하는 것을 방지하며, 각 시각 요소가 반드시 신호 기반(signal driven)으로 작동해야 한다는 조건을 보장한다. 결과적으로 시각화는 음향적 구조를 “해석 가능한 형태로 번역된 데이터”로서만 존재하며, 그 이상으로 확장된 상징적 해석을 부여하지 않는다.

③ 시각화 시스템의 전체 구조

본 연구의 시각화 시스템은 다음 세 개의 핵심 모듈로 구성된다. 첫째, 오퍼레이터 표현 모듈은 각 FM합성의 오퍼레이터의 출력 에너지(특히 CC11: expression과 엔벨로프의 실시간 값을 기반으로 RGB 컬러 값을 생성하여 배경 및 화면 전반의 색상 변화를 구성한다. 이 모듈은 오퍼레이터 간 에너지 대비를 통해 전체 FM합성 구조의 중심과 주

변 관계를 드러내도록 설계되어 있다. 둘째, 노트·시간 기반 선형 패턴 모듈(`jit.gl.path` 객체)는 MIDI 노트 온/오프, 벨로시티, 시간 인덱스 등 이벤트 기반 데이터를 시각 좌표로 변환하여, 시간적 흔적(trace)과 폴리모듈레이션에 따른 비동기 흐름을 선형 구조로 가시화한다. 이는 FM합성 내부의 시간 변조 패턴을 외부적으로 읽을 수 있는 형태로 드러내는 역할을 한다. 셋째, 위상 기반 패턴 모듈은 캐리어 좌·우 신호의 위상 차이를 포착하여 실시간 리사주 패턴(Lissajous Pattern)³⁵⁾으로 렌더링함으로써, 멀티채널 드리프트와 디코릴레이션의 물리적 형태를 영상으로 제공한다. 이 아키텍처는 이후 섹션에서 상세히 다루는 데이터 매핑 방식, 시각화 알고리즘, 인터페이스 구성의 기반을 제공한다.

2) 데이터 맵핑 구조

본 절에서는 멀티채널 폴리모듈레이션 FM합성 시스템에서 생성되는 내부 신호들이 시각화 계층으로 어떻게 전달되고, 어떠한 변환 과정을 거쳐 Jitter 기반 시각 요소로 매핑되는지 기술한다. 시각화는 단순히 음향의 외부적 모습을 “장식적으로 표현”하는 것이 아니라, FM합성의 내부 상태를 실시간으로 계측하고 분석 가능한 형태로 변환하는 절차이기 때문에, 각 데이터 스트림의 분리와 결합 방식, 그리고 그 변환 규칙이 전체 시스템의 개념적 일관성을 유지하는 데 핵심적인 역할을 한다. 본 연구에서는 시각 신호가 반드시 실제 DSP 신호의 구조적 특징을 반영해야 한다는 원칙 아래, ① 에너지 기반 데이터, ② 시간·노

35) 두 개의 주기 신호를 서로 직교하는 X-Y 축에 각각 할당하여 위상 차이, 주파수 비율, 진폭 관계를 기하학적 곡선 형태로 시각화한 패턴을 의미한다. 주로 신호 간의 위상 관계와 동기성, 디코릴레이션 상태를 분석하는 데 사용되며, 오디오 및 전자음향 맥락에서는 스테레오 채널 간 상관관계나 진동 구조를 직관적으로 드러내는 시각화 방식으로 활용된다.

트 기반 데이터, ③ 위상 기반 데이터 라는 세 가지 데이터 계층을 설정하였다.

① 에너지 기반 데이터

첫 번째 계층은 오퍼레이터 출력의 “에너지 흐름”을 시각적으로 변환하는 구조로, 음향적 스펙트럼의 중심성이 시간적 강약의 형태로 드러나는 과정이다. FM합성 오퍼레이터에서 가장 중요한 에너지 파라미터는 엔벨로프를 이용한 실시간 진폭변화, 키 트래킹, 그리고 CC11: expression의 조합으로 생성되는 최종 증폭 값이다. 이 값은 M4L의 **plu gsend~**객체를 통해 별도의 Jitter 패치로 전달되며, RGB 컬러 값으로 직접 매핑된다. 컬러 매핑은 다음과 같은 구조적 논리 위에서 설계되었다. 첫째, 캐리어 오퍼레이터의 출력 에너지는 전체 화면의 기본 색조를 결정하며, 이는 FM합성 시스템의 “중심성”을 표현한다. 둘째, 세 모듈레이터의 에너지 값은 각각 독립된 색상 채널 또는 밝기/채도 계층으로 배치되어, 주변 변동의 층위를 드러낸다. 셋째, 이들 값은 동일 시간축에서 동기화되지 않으며, 각 오퍼레이터는 서로 다른 MIDI 채널 및 엔벨로프 구조를 가지므로, 결과적으로 시각적 변화도 서로 다른 속도·밀도를 가진다.

② 시간·노트 기반 데이터

두 번째 계층은 MIDI 입력 스트림을 기반으로 한 이벤트 중심 데이터(event driven data)이다. MIDI 노트 온/오프, 노트번호, 벨로시티 등은 FM 합성에서 오퍼레이터의 주파수·진폭·엔벨로프 구조를 결정하는 핵심 요소이며, 시각화에서도 이 값들이 실시간 흐름 생성의 기반이 된

다. 이러한 매핑은 `jit.gl.path` 객체를 기반으로 하며, FM 합성 시스템에서 다중 모듈레이터가 독립적으로 작동하는 구조가 시간적으로 분리된 궤적으로 시각화되는 효과를 낳는다. 각 모듈레이터는 서로 다른 MIDI 채널을 사용하므로, 화면에는 서로 다른 속도의 선형 구조가 비동기적으로 축적되며, 이는 FM 합성 시스템 내부의 폴리모듈레이션 구조를 직관적으로 드러낸다. 해당 구조는 “관상의 이미지화”가 아니라, FM 합성 내부의 이벤트 흐름을 그 자체의 시간성으로 가시화하는 방식이다. 즉, 이 시각적 흐름들은 기도·심상의 연상 구조를 표현하는 것이 아니라, MIDI 기반의 변조 데이터를 그대로 시각적 궤적으로 노출하는 분석적 표현이다.

③ 위상 기반 데이터

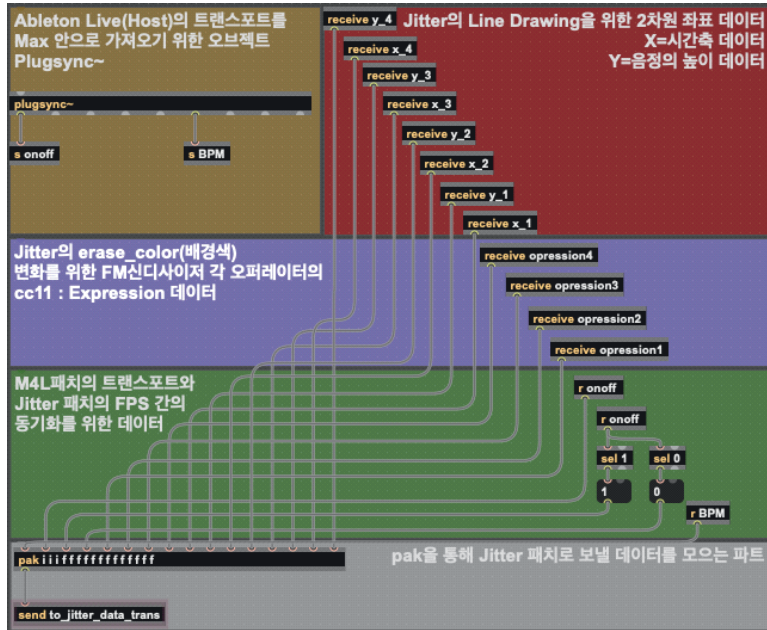
위상 기반 데이터는 본 연구의 멀티채널 폴리모듈레이션 FM 합성 시스템이 갖는 독특한 음향적 특성인 좌·우 채널의 미세한 주파수 드리프트, 비동기적 위상 흐름, 그리고 그에 따른 디코릴레이션을 시각적으로 계층하기 위한 핵심 구조이다. 이는 소리를 ‘그림처럼 보이게’ 하는 방식이 아니라, 멀티채널 FM 합성 알고리즘 내부에서 실제로 발생하는 위상 역학(phase dynamics)을 물리적·수학적 방식으로 외부에 노출하는 분석적 시각화 계층이다. 캐리어 오퍼레이터의 좌·우 오디오 신호는 먼저 `jit.catch~` 객체에 의해 일정한 샘플 블록 단위로 캡처된다. 이 단계는 실시간 DSP 신호를 Jitter 데이터 매트릭스로 변환하는 과정으로, 오디오 신호의 시간 축 정보가 유지된 채 시각화 계층으로 전달될 수 있게 한다. 이어서 캡처된 좌·우 신호는 `jit.gen` 객체 내부에서 2차원 좌표 정보로 변환된다. 이때 좌측 채널(left)은 x좌표, 우측 채널(right)은 y좌표로 치환되며, 두 좌표가 한 쌍의 점(point)을 구성

한다. 이 변환 과정은 단순한 그래프 그리기에 필요한 데이터 매핑을 넘어, FM합성의 캐리어의 실제 위상 이동이 2차원 공간에서 어떤 관계망을 구성하는지 그대로 드러내는 구조적 변환이다. 이러한 구조화된 좌표는 리사주 방식으로 렌더링되며, 시간에 따라 회전, 수축, 확장, 비대칭 변형 등 다양한 패턴의 위상 도형을 생성한다. 좌·우 두 채널은 **gen~패치** 알고리즘에서 서로 다른 노이즈 기반 드리프트와 서로 다른 **slide** 객체 속도를 적용받기 때문에, 이 도형은 완전한 원이나 안정된 패턴으로 귀결되지 않는다. 대신 미세한 불일치와 느린 변이의 연속으로 나타나며, 이는 시스템 내부의 비동기 위상 흐름을 그대로 추적한 결과이다. 변조 지수가 증가할 때 도형의 복잡도가 증가하는 것, 변조 주파수의 비율이 변할 때 도형의 기울기나 대칭성이 변화하는 것 등은 모두 FM합성 내부의 스펙트럼 변화를 실시간으로 시각화한 결과이다. 이는 멀티채널 FM합성 내부에서 발생하는 실제 물리적 신호 흐름을 그 자체의 논리로 변환해 보여주는 계층적 시각화 계층으로서, 음향 합성 구조의 투명성을 높이고 시스템 내부 변조 과정을 직관적으로 검증할 수 있도록 설계된 기능적 요소이다. 다시 말해, 이 도형들은 “관상의 이미지”를 묘사하는 것이 아니라, “FM합성 시스템 내부의 위상 구조가 시간에 따라 변화하는 방식”을 추적한 결과이며, 이러한 분석적 시각화는 멀티채널 폴리모듈레이션 FM합성 시스템의 구조적 이해를 돕는 중요한 역할을 한다.

3) 시각화 모듈별 설계

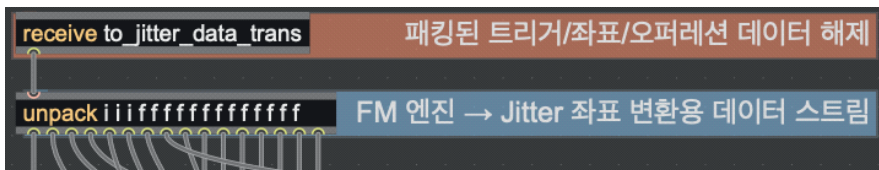
① 데이터 입력 및 분배 계층

데이터 입력 및 분배 계층은 M4L 기반의 FM합성 시스템에서 생성되는 구조적 정보를 Jitter 시각화 패치로 전달하기 위한 중간 허브 역할을 수행한다. 이 계층은 오디오 신호를 직접 다루지 않으며, 템포·트랜스포트 상태·오퍼레이터의 표현값·2차원 좌표 등 시각화에 필요한 메타 데이터를 수집하고 이를 일관된 포맷으로 변환하여 Jitter 모듈로 전달하도록 설계되었다. 다시 말해, 이 계층의 목적은 “FM 합성기의 내부 상태를 시각화 가능한 데이터 모델로 재조직하는 것”이며, 이는 이후의 위상 기반 시각화가 시스템의 실제 동작과 구조적 대응성을 유지하도록 하는 핵심 전제이기도 하다. 먼저 Ableton Live의 글로벌 트랜스포트 데이터는 [그림-15]와 같이 **plugsync** 객체에서 수집된다. 여기서 재생 여부, 연주 위치, BPM과 같은 시간 기반 제어 데이터가 출력되며, 시각화 패치 내부에서는 이를 전체 시스템의 기준 시간으로 사용한다. 이와 병행하여 M4L FM합성 내부에서 생성되는 네 개의 C C11: expression 값과 각 오퍼레이터의 2차원 좌표(x_n, y_n)는 **pak** 객체로 정리된다.



[그림-15] M4L 데이터를 Jitter 패치로 전달하기 위한 패치 구조

pak 객체는 다양한 성질의 데이터를 하나의 벡터로 묶어주며, 이는 Jitter 패치에서 “단일 프레임(frame)에 해당하는 시스템 상태”로 해석된다. 정리된 벡터는 **send to_jitter_data_trans** 객체를 통해 전달되어, Jitter 측에서 동일한 이름의 **receive** 객체를 통해 수신된다. Jitter 패치 내부에서는 **unpack i i i f f f f f f f f f f f f f f f f f f** 객체를 통해 전달된 벡터를 다시 개별 값으로 [그림-16]과 같이 분해한다.



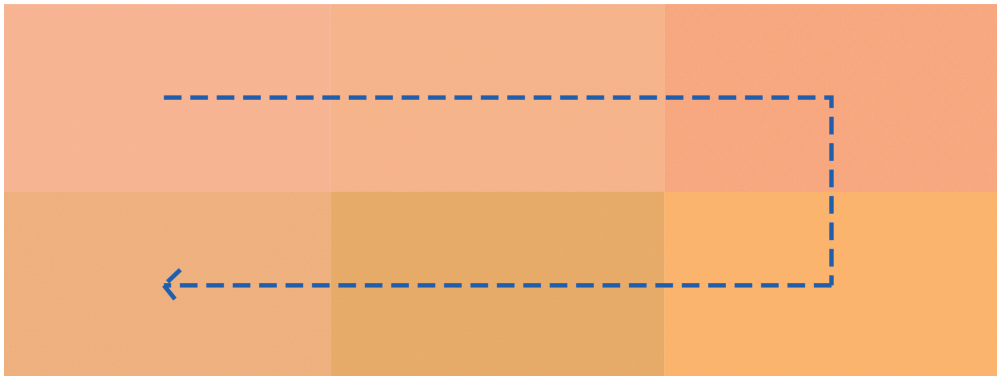
[그림-16] Jitter로 패치로 전달된 M4L 데이터 패치 구조

이 과정은 단순히 데이터를 되돌리는 목적이 아니라, 시간 계층(temporal layer), 위상 좌표 계층(trajjectory and phase layer), 에너지 표현 계층(expression layer) 등 서로 다른 시각화 모듈로 정보를 분배하기 위한 목적을 가진다. 예를 들어, 트랜스포트 데이터는 시간 동기화 모듈에서 **qmetro**객체의 구동 타이밍과 제어용 **phasor**~객체의 위상 진행을 동일한 시간 축에 정렬하기 위한 참조 데이터로 사용되며, 네 개의 익스프레션 값은 색상·명도·밀도 변화 등의 시각적 에너지 표현으로 변환된다. 각 오퍼레이터의 x_n, y_n 좌표 객체는 독립적인 **receive**객체로 전달되어 개별 경로(궤적) 모듈에서 비동기적 곡선 운동을 생성한다. 이러한 **send/receive**객체 기반 분리 구조는 오디오 경로와 시각화 경로가 서로 간섭하지 않도록 하면서도, 좌표·표현·시간 데이터가 필요에 따라 여러 시각화 모듈에서 병렬로 활용될 수 있게 한다. 결과적으로 데이터 입력 및 분배 계층은 FM합성 엔진에서 생성되는 다양한 상태 정보를 시각화 가능한 구조 단위로 재구성하는 단계이며, 이는 이후 시각화 모듈들이 관상 구조의 위상적 특성(중심, 주변, 미세 변화)을 체계적으로 표현할 수 있는 토대를 제공한다. 다시 말해, 이 계층은 Jitter 시각화 전체의 데이터 기반 리듬과 위상을 규정하는 핵심적 허브로 기능하며, 본 연구에서 음향과 시각의 구조적 대응성을 유지하는 데 필수적인 역할을 수행한다.

② 글로벌 렌더링 루프와 시각화 트리거 제어 구조

본 패치는 Jitter 기반 비주얼 시스템의 상위 제어 신호를 구성하는 핵심 블록으로, 전체 프레임 렌더링 주기·장면 초기화(clear)·배경 색상 변화(erase_color)를 동기적으로 관리한다. [그림-17]은 **receive** trig - qmetro - t b b b b 객체 구조를 기반으로 한 시간 분배와, 배경 상태를 구성하는

지만 동일한 시간 그리드에서 동기적으로 작동하는 일관된 장면 갱신 흐름을 확보하게 된다. 배경 색상 처리 역시 동일한 시간 계층 안에서 이루어진다. **send** b3객체로 분배된 트리거는 **receive** b3객체를 통해 수신되며 이는 **pack** 0. 0. 0. 0.객체안의 데이터를 보내는 용도로 쓰인다, **scale**객체는 데이터 분배 계층에서 온 FM합성 패치 데이터의 CC 11: expression 데이터를 전달받는다. 각 **scale**객체는 입력값(0-1 범위)을 서로 다른 범위(예: 0.1 -0.8, 0.1 -0.6, 0.1 -0.3 등)로 매핑하여 배경의 RGB 성분을 생성한다. 이후 **pack** 0. 0. 0. 1.객체는 세 개의 색상 성분과 알파값(투명도)을 하나의 RGBA 리스트로 결합한다. 이 리스트는 **prepend** erase_color객체를 거쳐 erase_color R G B A 메시지 형태로 변환되며, 최종적으로 **jit.world** world1객체에 전달되어 [그림-18]과 같이 시간에 따른 파라미터 값의 변화량에 따라 배경 색상 상태를 갱신한다.



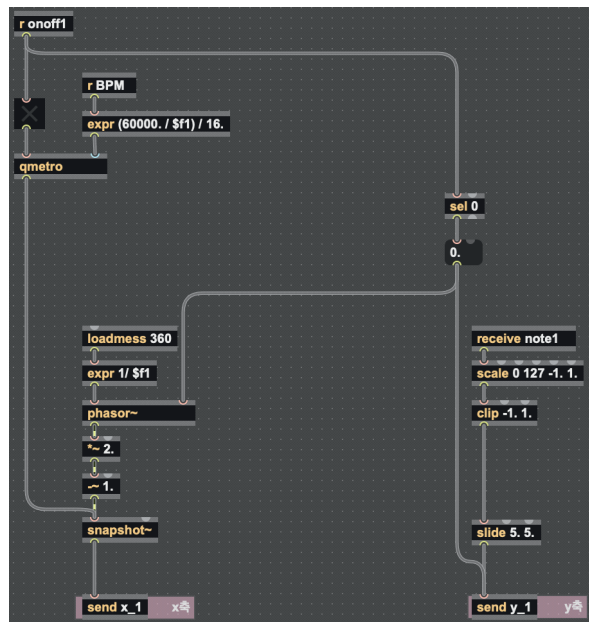
[그림-18] erase_color의 변화

이 구조는 FM합성 신호의 미세한 시간 변화가 시각화 배경의 농담·명암 변화로 확장되도록 설계된 것이다. 전체적으로 본 패치는 오디오 기반 FM합성 시스템에서 발생하는 상위 트리거와 시간 정보를 Jitter

비주얼 전체로 동기적·계층적으로 확산시키는 중심적인 허브 역할을 수행한다. world1객체의 enable, sync, highres 설정과 함께 구성된 본 계층은, 이후 단계에서 설명될 좌표 생성 모듈 및 라인 드로잉 모듈이 모두 동일한 시간 기반 환경 위에서 작동하도록 하는 필수적 기반을 형성한다.

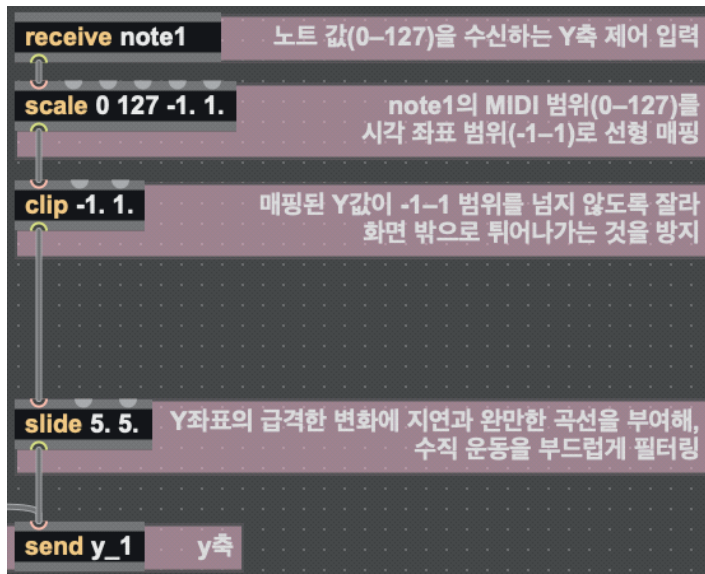
③ 라인 드로잉 계층의 좌표 생성 모듈 설계

좌표 생성 모듈은 FM합성 엔진의 시간 기반 위상 신호를 Jitter의 2차원 선(line)으로 시각화하기 위해, 실시간으로 x_1 , y 좌표를 생성·정규화·평활화(smoothing)·송출하는 역할을 수행하며, 각 과정은 [그림-19]와 같이 이어진다.



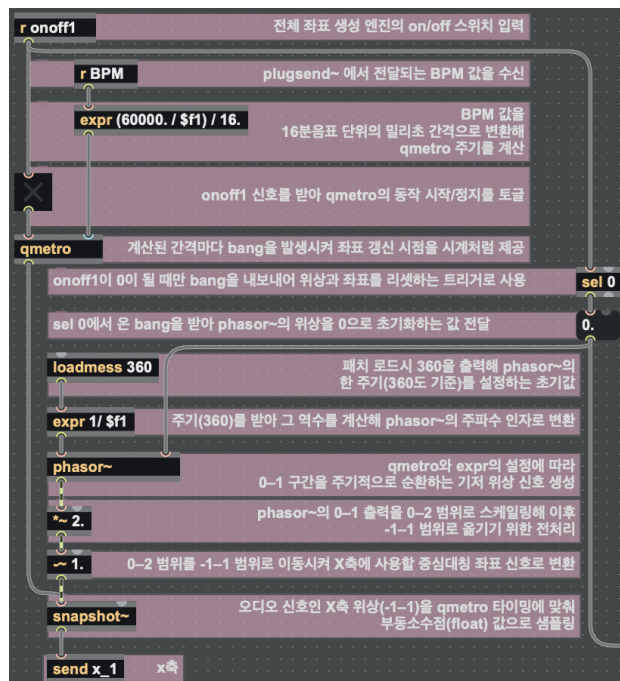
[그림-19] 좌표 생성 모듈 패치 구조

[그림-20]와 같이 **receive note1** 객체는 상위 M4L로부터 전달된 특정 오퍼레이터의 MIDI 노트 데이터를 수신한다. 이 값은 즉시 **scale 0 127 -1. 1.** 객체에 입력되어 -1에서 1 사이의 정규화된 실수 범위로 매핑된다. 이 정규화 과정은 Jitter에서 사용하는 좌표계(중심 0, 범위 -1~1)와 직접 호환되는 값으로 변환하기 위한 단계이다. 정규화된 값은 이후 **clip -1. 1.** 객체를 거쳐 좌표 데이터의 상한·하한을 안정적으로 고정시키며, 이 과정은 갑작스럽게 튜 위험을 방지한다. **clip** 객체를 통과한 값은 **slide 5. 5.** 객체로 전달된다. 이 평활화 객체는 x/y 좌표가 프레임 단위로 급격하게 변하는 문제를 완화하며, 변화량을 시간적으로 완만하게 만들어 Jitter에서 그려지는 선이 부드러운 곡률을 갖도록 보장한다. **slide** 객체 이후의 출력은 **send y_1** 객체와 같이 전용 채널로 송출되며, 실시간 Jitter 렌더링 모듈에서 1번 오퍼레이터의 y 좌표 데이터로 사용된다.



[그림-20] 라인 드로잉 계층을 위한 y축 데이터 생성 패치 구조

동일한 구조가 [그림-21]처럼 x축에도 적용되는데, **snapshot~**객체 기반 변조 흐름에서 생성된 신호가 **send x_1**객체를 통해 전달된다. 반면 x좌표 흐름은 시간 기반 변조 구조와 연결되어 있다. **r onoff1**객체는 전역 온/오프 상태를 수신하여 현재 **phasor~**객체 기반 변조가 작동할지 여부를 결정한다. 이 온/오프 신호는 **toggle**객체로 전달되어 사용자가 모듈의 활성화 상태를 즉시 확인하고 조작할 수 있도록 한다. **toggle** 출력은 **qmetro**로 연결되며, 이는 일정 주기의 **bang**을 발행해 x좌표 갱신 주기를 결정한다. 즉, y축이 피치 기반 변조로 움직인다면, x축은 시간 기반 위상 변화에 의해 움직이게 되는 것이다. BPM을 기반으로 한 시간 변조는 **r** BPM의 데이터가 **expr (60000. / \$f1) / 16.**로 전달되는 흐름을 통해 이루어진다.



[그림-21] 라인 드로잉 계층을 위한 x축 데이터 생성 패치 구조

이 **expr**객체는 BPM을 1/16박 주기의 밀리초 단위 시간으로 환산하여 **qmetro**객체의 두 번째 인렛으로 제공한다. 이 방식은 Jitter 프레임 단위 좌표 생성이 FM 합성 엔진과 동기적 시간 구조를 공유하도록 설계된 것이다. **qmetro**객체가 **bang**을 출력하면 **snapshot~**객체는 **phasor~**객체를 기반으로 생성된 변조 신호를 매 프레임 소수 값으로 샘플링한다. **phasor**는 **loadmess 360**객체에 의해 초기화되며, **expr 1/\$f1**객체에서 역수 계산을 통해 속도 조절이 이루어져 **phasor**의 위상 증분량을 결정한다. 이후 ***~ 2, -~**객체의 연산을 거쳐 -11 범위의 정상화된 x좌표 형태로 변환된다. **snapshot**가 이를 순간적인 숫자 값으로 변환하여 **send x__1**객체를 통해 최종 x좌표 데이터가 Jitter 렌더러로 송출된다. 선 그리기 모듈 전체는 시간 기반 변조와 음고 기반 변조를 상호 직결함으로써, FM 엔진 한 오퍼레이터의 위상 변화와 스펙트럴 움직임이 2차원 궤적 형태로 변환되도록 한다. x축은 변조된 시간 흐름을, y축은 피치 기반의 중심 이동을 나타냄으로써, 각 오퍼레이터가 하나의 독립된 실시간 궤적을 만들어낸다.

④ 라인 드로잉 계층 설계

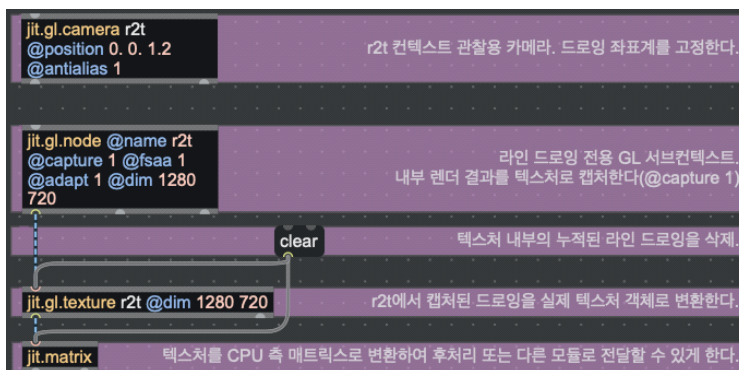
[그림-22]는 jitter 비주얼 패치 안에서 라인 드로잉 계층 구조를 나타낸다. 이 계층은 크게 두 종류의 입력을 사용한다. 첫째는 상위 시간 기반 제어 계층에서 전달되는 트리거(**b1, messbang, clear**), 둘째는 M4L FM합성 패치에서 전송되는 4개의 점 좌표($x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_4, y_4$)이다. 이 두 신호가 결합되어 매 프레임마다 새로운 세트의 점들이 jitter 패스(path)에 append되고, append된 점들은 layer 0~3에 대응하는 네 개의 **jit.gl.path**객체에서 독립적으로 그려진다. 라인 드로잉 계층의 핵심은 **pack append f f f** 객체의 구조다. 각 **pack**객

체는 총 세 개의 실수 입력을 받아 append x y z 형태의 메시지를 만든다. 이 중 첫 번째 요소 x는 **receive** b1 객체에서 오는 프레임 단위 **bang**에 의해 갱신되고, 나머지 두 요소 y와 z는 M4L FM합성 패치의 좌표 생성 모듈의 데이터(x_n, y_n)에서 온다. 예를 들어, **pack append f f f**(계층 3)객체는 **receive** b1 → 인렛 1, x__4 값 → 인렛 2, y__4 값 → 인렛 3 과 같이 매핑된다. M4L에서 전송된 데이터는 **clip** -1. 1. → **slide** 5. 5. → **send** x__n / **send** y__n 객체의 구조를 통해 평활화된 상태로 Jitter 패치에 도달한다. 즉, Jitter 쪽에서 받는 x__n, y__n 신호는 이미 오디오 패치의 모듈레이터/캐리어 엔벨로프, FM합성의 지수 변화, 키 트래킹 등 음악적 움직임이 시간적으로 평활화된 값이다.



[그림-22] 라인 드로잉 계층의 패치 구조

이 때문에 시각화 결과물은 음향의 급격한 진동이나 변조를 그대로 복사하지 않고, 음악적 “흔적(trace)”을 드로잉하는 특성을 갖는다. 계층별 초기 상태는 `loadmess append -1. 0. 0.` 메시지를 통해 정해지며, 각 계층별 `gl_color`는 `loadmess gl_color ...` 메시지로 지정된다. 이후 `receive b1`객체가 `bang`을 발생시키면 `pack append f f f`객체가 `append` 메시지를 생성하여 `message append x y z`객체로 전달되고, 이 메시지가 `jit.gl.path r2t`객체로 들어가 실제 화면에 라인이 추가된다. 각 `jit.gl.path`객체는 `automatic 1, antialias 0, depth_enable 0` 옵션을 갖고 있으며, `poly_mode 1 1`을 통해 “line strip” 모드로 세 점이 순차적으로 이어 그려지게 된다. 계층의 속성은 0-3으로 지정되어, 네 개의 `path`가 서로 겹쳐도 화면에 독립된 깊이 계층으로 정렬되어 나타난다. 프레임 초기화는 `clear`메시지 명령으로 수행된다. `receive clear`객체는 `jit.gl.path`객체들에게 직접 연결되어, 특정 타이밍(예: 노트 온, 패턴 리셋, 변조 구조 변화 등)에 `path`를 모두 지우고 새 흔적을 다시 그리게 한다. [그림-23]에서 처럼 이렇게 생성된 선분은 모두 `jit.gl.node @name r2t @capture 1 @fsaa 1 @adapt 1 @dim 1280 720`객체 내부에서 렌더된다.

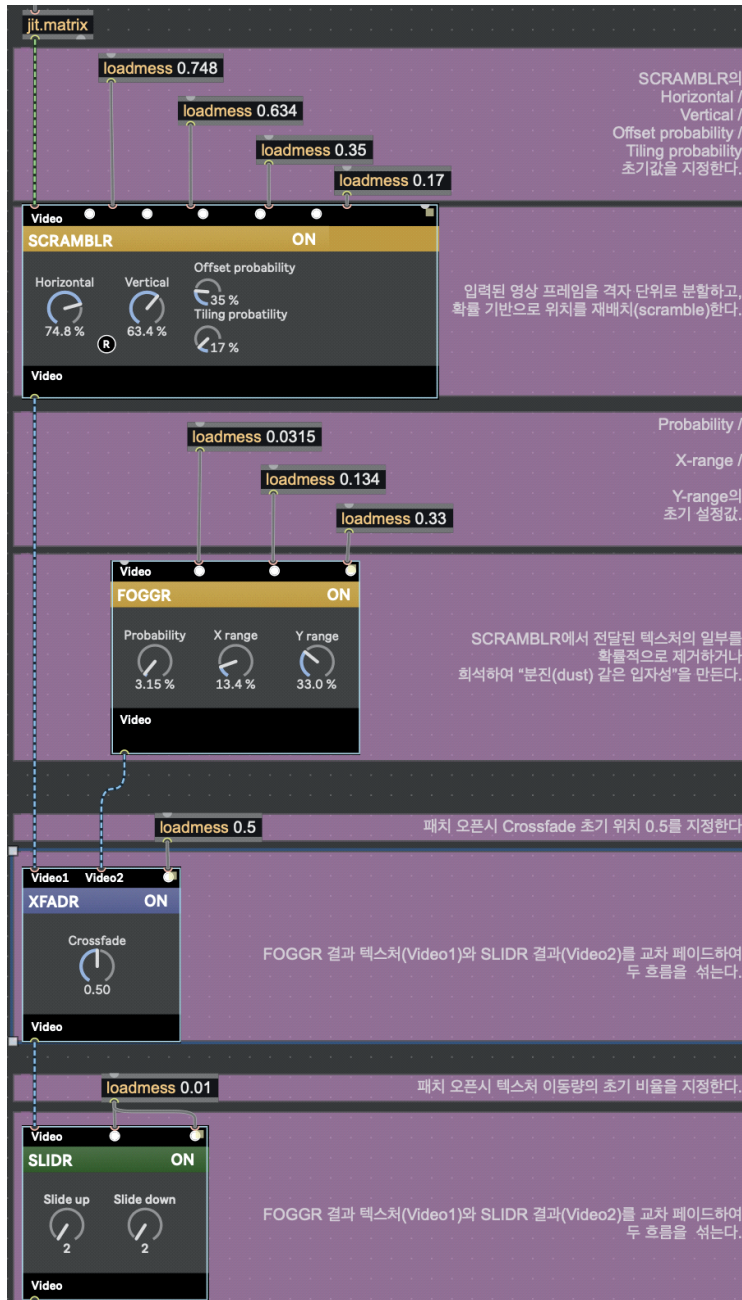


[그림-23] GL텍스처를 매트릭스로 변환하는 패치 구조

r2t라는 이름의 GL 노드는 라인 드로잉만을 위한 독립된 렌더 타깃으로 기능하며, @capture 1 속성에 의해 이 노드 안에서 발생하는 모든 GL 드로잉 결과는 하나의 **jit_gl_texture** 객체로 동시에 캡처된다. 이 단계에서 **jit.gl.camera** r2t @position 0. 0. 1.2 @antialias 1 객체가 카메라 역할을 수행하여, r2t 노드 내부의 좌표계와 시야를 고정해 준다. 다시 말해, 라인 드로잉은 world1 전체가 아니라 r2t라는 서브 컨텍스트 안에서 먼저 하나의 “텍스처 공간”으로 정리되고, 이후 다른 영상 요소들과 합성된다. r2t 노드의 첫 번째 outlet은 **jit.gl.texture** r2t @dim 1280 720 객체로 전달된다. 이 객체는 캡처된 렌더 타깃을 명시적으로 텍스처화하여 이후 체인에서 재사용할 수 있게 하는 GL 측 버퍼이다. 여기서 중요한 점은, 사용자가 **message** clear(위 패치의 clear 메시지)를 보내면, 이 clear가 **jit.gl.texture** 객체와 **jit.matrix** 객체 양쪽으로 동시에 전달된다는 점이다. clear 메시지는 r2t 텍스처에 누적되어 있던 모든 선 정보를 삭제하고, 다시 완전히 비어있는 캔버스 상태에서 새로운 궤적을 쌓기 시작하게 한다. **jit.gl.texture** 객체의 출력은 곧바로 **jit.matrix** 객체로 이어진다. 이 마지막에 **jit.matrix** 객체를 두는 이유는 단순히 GL에서 CPU 쪽으로 데이터를 내려받기 위해서가 아니라, 이후 다양한 후처리 경로를 열어 두기 위함이다. 첫째, **jit.matrix** 객체로 변환된 라인 드로잉은 [그림-24]과 같이 vizzle³⁶⁾의 **scramblr**, **foggr**, **xfadr**, **slidr**와 같은 텍스처 기반 이펙터로 분기시킨다. 둘째, **jit.matrix** 객체는 GL 기반 처

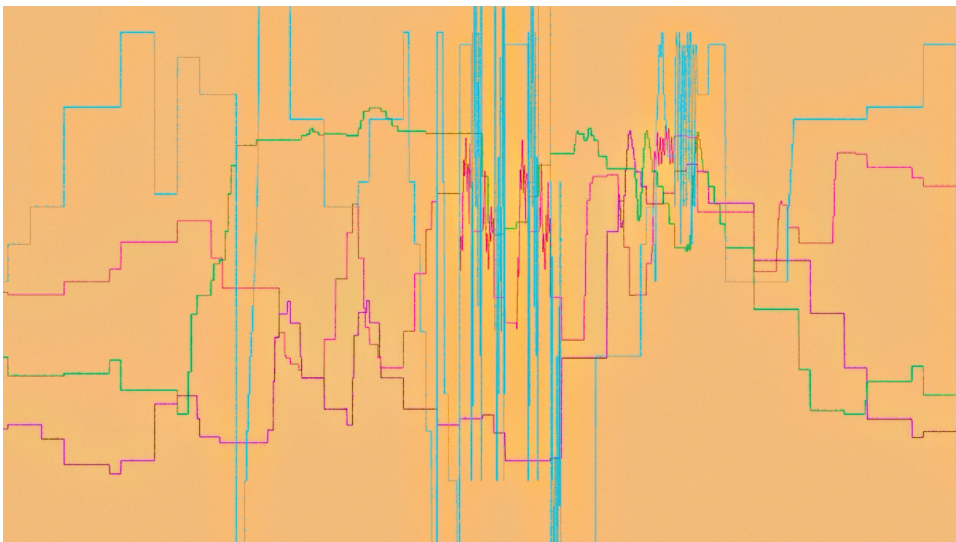
36) 독일 ZKM(Zentrum für Kunst und Medien Karlsruhe)의 연구 환경에서 개발된 Max 기반 시각화·오디오비주얼 확장 툴킷으로, 기존 Max/MSP가 제공하는 jit.gl 계열의 저수준 OpenGL 접근 방식과 달리, 고수준의 모듈형 GUI 기반 패치 환경을 제공함으로써 복잡한 실시간 오디오 반응형 그래픽 구조를 보다 직관적으로 구성할 수 있도록 설계된 도구이다. 본 연구에서는 FM 합성 엔진에서 생성되는 파라미터 흐름을 Jitter 환경으로 전달하기 전에 특정 상태값을 구조화하고 시각 계층의 논리 단위로 분할하는 보조 도구로 활용하며, 이는 복잡한 오퍼레이터 상호 변조 관계를 분석적 형태로 가시화하기 위한 중간 계층 역할을 수행한다.

리뿐만 아니라 이렇게 텍스처 경로 + 매트릭스 경로를 모두 열어둠으로써, 라인 드로잉은 단일 렌더링 방식에 종속되지 않고, 다양한 계층 구조를 형성하는 기저 재료로 기능한다. 예컨대 동일한 라인 드로잉 데이터가 한쪽에서는 **foggr**를 통해 입자화되고, 동시에 다른 경로에서는 **scramblr**를 통해 그리드 형태로 재조합될 수 있으며, 최종적으로 **xfadr**를 통해 합성된다. 셋째, **jit.matrix**객체를 거치는 구조는 라인 드로잉 결과를 하나의 GL 패스에 가두지 않고, 여러 개의 이펙터 모듈이 공유할 수 있는 공용 버퍼 형태로 유지하게 한다. 이로 인해, FM합성의 위상 운동을 시각화한 2차 표현은 단순히 그려진 선으로서 기능하는 것이 아니라, 시각적 구조를 빚어내기 위한 재료로 변환된다. 본 연구에서의 시각화 시스템은 선 자체를 목적화하지 않고, 그 선을 다시 해체·분절·입자화하여 새로운 공간적·시간적 구조를 생성하는 방식으로 설계되었으며, **jit.matrix**객체는 이러한 모듈식 재조합의 중심에 위치한다.



[그림-24] vizzle의 비주얼 이펙터 시그널 구조

결과적으로 `jit.matrix` 객체는 “라인을 GPU에서 CPU로 내리는 장치”가 아니라, “라인을 후속 변형의 재료로 전환하고, 다양한 시각 처리 모듈 간 공유가 가능하도록 만드는 버퍼 계층”이다. 이 계층을 통해 FM합성 시스템의 내부 위상 변화가 단일한 연출로 환원되지 않고, 복수의 시각적 층(layers)으로 동시에 확장되는 구조가 되며 [그림-25]와 같은 비주얼로 완성 되어진다.



[그림-25] 완성된 라인 드로잉 계층의 이미지

⑤ 리사주 패턴 및 변형 모듈

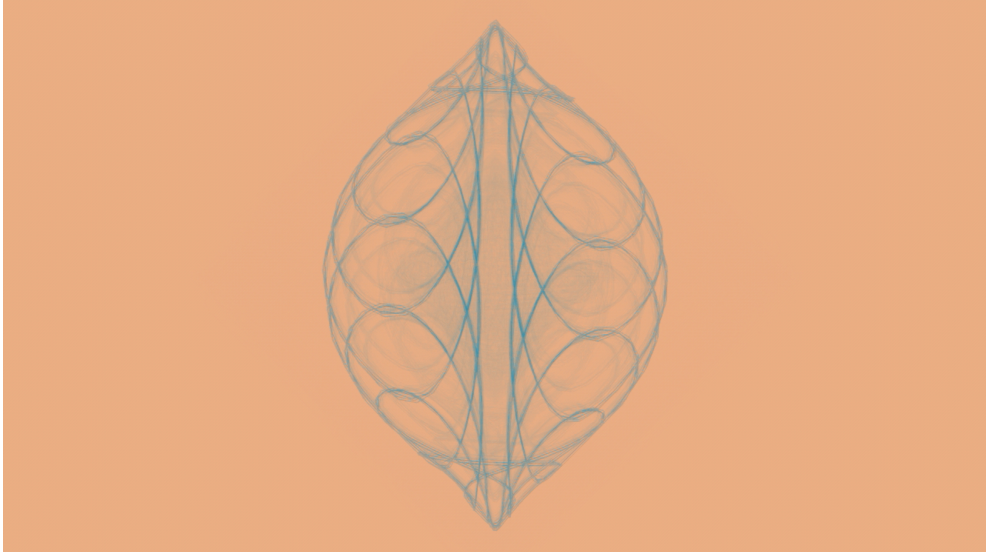
[그림-26]의 리사주 패턴 생성 계층은 본 연구의 시각 구조 중 가장 직접적으로 FM합성 엔진의 내적 동적인 역학을 드러내는 계층으로서, 오디오 신호를 기반으로 한 위상 기반 곡선을 화면 상에 실시간으로 그리는 역할을 수행한다.



[그림-26] 리사주 패턴 생성 패치 구조

이 모듈은 M4L 환경에서 생성된 FM합성의 각 오퍼레이터의 오디오 스트림을 **plugreceive~ au**, **plugreceive~ au2** 객체로 받아들이는 것에서 시작한다. 두 신호는 **jit.catch~ 2 @framesize 1024** 객체를 통해 일정 크기의 프레임 단위로 샘플링되어 **jit.matrix** 형태의 2열(float32) 데이터로 변환된다. 즉, 좌측 오디오 스트림은 X축, 우측 오디오 스트림은 Y축의 시간적 변화를 대표하여, 서로 다른 주파수·위상·변조 상태를 갖는 두 오퍼레이터의 운동성이 [그림-27]와 같은 결합된

리사주 곡선을 구성한다.

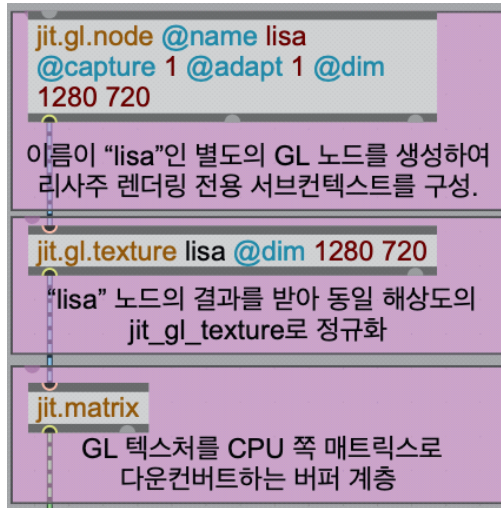


[그림-27] x축 과 y축으로 전송된 오디오의 리사주 패턴화

`jit.catch~` 객체의 출력은 `jit.gl.mesh` 객체로 전달된다. 이 객체는 `draw_mode`를 `line_strip`으로 설정하여 전달된 1024개 샘플을 하나의 연속적인 곡선으로 렌더링한다. 이때 `@antialias 1`, `@line_width 1` 등의 인자는 곡선의 미세한 윤곽을 매끄럽게 유지하기 위한 설정이며, `@position 0 0 1` 및 `@rotate 45 0 0 1` 값은 카메라와의 관계에서 곡선을 부각시키는 방식으로 회전 및 공간 배치를 수행한다. 이러한 처리 방식은 단순한 XY 오실로스코프(oscilloscope)³⁷⁾ 시각화를 넘어서서, FM합성의 신호 간 상호작용이 만들어내는 위상적 진동을 “실체적 형상”으로 제시한다는 점에서 중요하다. [그림-28]와 같이 렌더링된 곡

37) 전기적 또는 오디오 신호의 시간에 따른 파형 변화를 X-Y 좌표계 상에 실시간으로 표시하는 계측 장치로, 전통적으로는 시간 대비 진폭을 시각화하는 데 사용된다.

선은 `jit.gl.node @name lisa @capture 1` 객체에 의해 GL 텍스처로 포착되고, 이어서 `jit.gl.texture lisa @dim 1280 720` 객체를 통해 독립적인 텍스처 버퍼로 정리된다.



[그림-28] 리사주 전용 GL 서브컨텍스트 구성 및 텍스처에서 매트릭스로의 변환 구조

이후 `jit.matrix` 객체를 위치시키는 이유는 단순히 GPU 데이터를 CPU로 내리는 목적이 아니라, 이 리사주 곡선을 후속 처리의 ‘공통 입력 포맷’으로 통일하기 위함이다. 즉, 라인-드로잉을 단일 GL 패스로 고정하지 않고, 텍스처 기반 vizzle 이펙터 경로로 분기시킬 수 있도록 하기 위해 `jit.matrix` 객체를 경유점으로 둔다. 리사주 곡선의 후처리 단계에서는 [그림-29]과 같이 vizzle 모듈이 사용된다. `jit.matrix` 객체로 변환된 곡선은 이후 `SLIDR`로 보내진다.

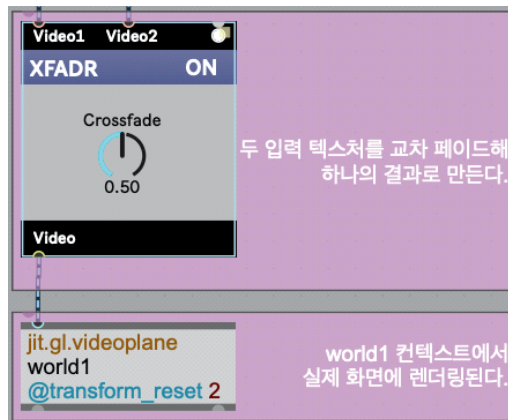


[그림-29] vizzle의 SLIDR

SLIDR 모듈은 `loadmess 0.01` 객체의 슬라이드 값을 적용하여 곡선을 상하 방향으로 미세하게 번지게 함으로써, 정적 형태의 선이 아니라 지속적으로 미끄러지고 흔들리는 “진동의 표면”으로 재구조화한다. 이 전체 파이프라인은 `plugreceive` 객체를 통한 오디오 기반 입력 → `jit.catch` 객체의 샘플링 → `jit.gl.mesh` 객체의 공간적 곡선 렌더링 → `jit.gl.node` 및 `jit.gl.texture` 객체를 통한 텍스처 캡처 → `jit.matrix` 객체의 변환 → SLIDR를 통한 텍스처 기반 후처리 순으로 구성된다. 이러한 다단계 시각화 체계는 FM합성 엔진의 물리적 파형을 단순히 시각적으로 보여주는 것이 아니라, 그 내부의 비선형적 관계성인 주파수 비, 위상 편차, 모듈레이션 인덱스의 변동이 내포한 관상적 진동성을 영상 내에서 스스로 확장·변형·발현하도록 설계되어 있다. 요컨대 리사주 패턴 계층은 단순한 오실로스코프형 도식이 아닌, 오디오 신호의 위상적 결속이 시각적 구조로 되어지는 핵심 계층이다.

⑥ 비주얼 계층의 최종 통합과 출력

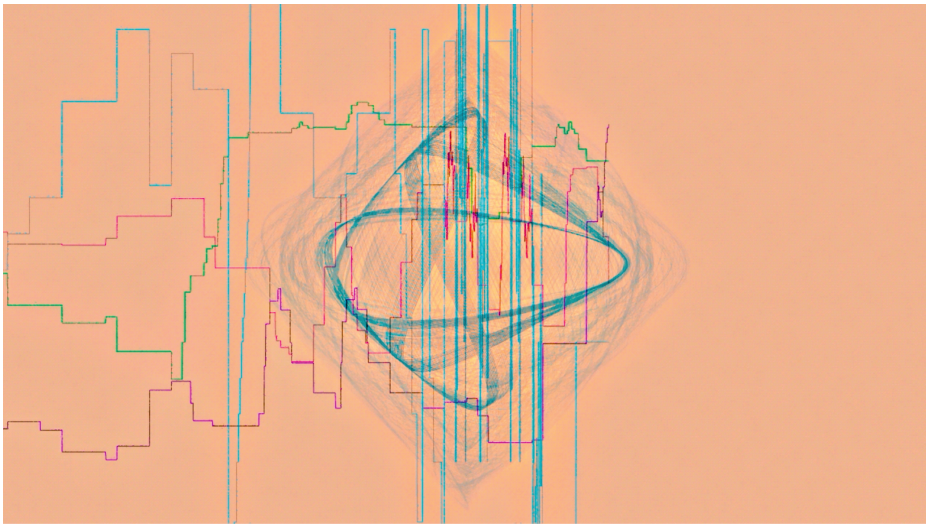
여기서는 앞 단계들에서 각각 독립적으로 생성된 두 개의 시각 계층이 하나의 최종 화면으로 통합되는 과정을 다룬다. 하나는 **r2t** 서브컨텍스트에서 그려진 라인 드로잉 기반의 계층이고, 다른 하나는 **lisa** 서브컨텍스트에서 생성된 리사주 패턴 계층이다. 각 계층은 이미 독립적인 조형적 성격을 갖고 있지만, 작품의 최종 영상은 이 둘이 단절된 채 병치되는 것이 아니라, 특정 비율로 혼합되어 단일한 시각 흐름으로 제시되어야 한다. 이 두 흐름을 하나의 영상으로 섞는 역할을 수행하는 것이 바로 [그림-30]에 나타난 vizzle의 **XFADR** 객체이다.



[그림-30] XFADR 기반 최종 이미지 블렌딩과 world1 출력 구조

XFADR는 Video1과 Video2 두 입력을 받아 서로 다른 텍스처를 가중치에 따라 교차 페이드하는 장치이며, 이 패치에서는 Video1에 라인 드로잉 계열의 텍스처가, Video2에 리사주 패턴 계열의 텍스처가 각각 입력된다. 초기 상태는 **loadmess 0.5** 객체로 지정되어 있어 두 계층이 정확히 절반 비율로 혼합된 상태에서 시작한다. 그러나 이 비율은

실시간으로 조정될 수 있으며, 그에 따라 화면은 선의 움직임이 더 두드러진 상태에서 리사주 기반 패턴의 밀도가 강조된 상태 까지 스펙트럼을 이루며 변화한다. 이는 영상이 단일한 형식으로 고정되지 않고, 감정적 흐름에 따라 유동적으로 재구성될 수 있게 해주는 중요한 지점이다. [그림-31]은 합쳐진 두 텍스처 계층의 모습을 보여준다.



[그림-31] XFADR로 합쳐진 두 텍스처 계층

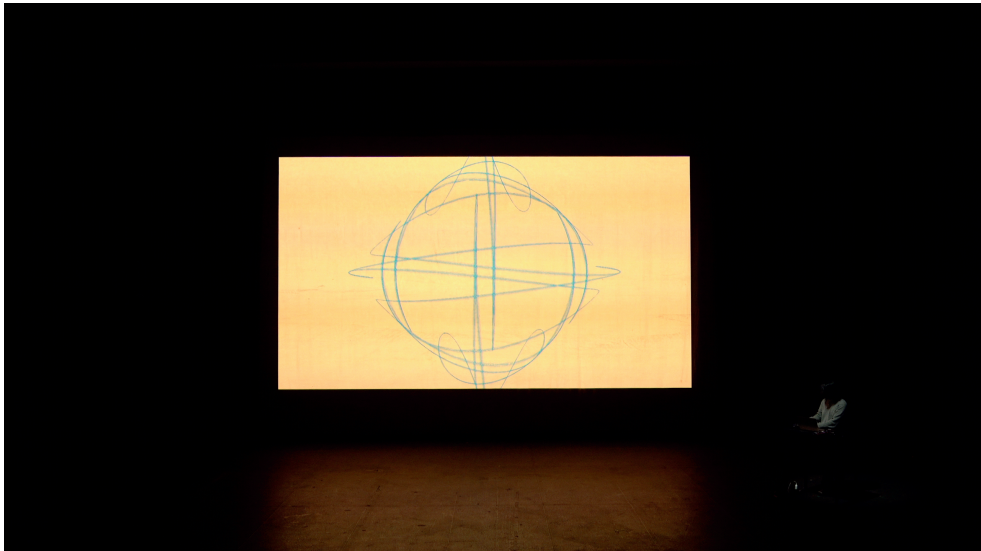
XFADR를 통해 혼합된 최종 텍스처는 `jit.gl.videoplane world1 @transform_reset 2` 객체로 전달된다. `world1`은 작품 전체의 출력이 이루어지는 메인 GL 컨텍스트이며, `videoplane` 객체는 최종 텍스처를 화면에 실제로 투사하는 일종의 출력 스크린이다. `transform_reset 2` 옵션은 내부 서브컨텍스트(`r2t`, `lisa`)의 좌표계나 카메라 세팅에 영향을 받지 않도록 최종 영상의 위치와 스케일을 항상 일정하게 유지시켜 준다.

Ⅲ. 연구 기술의 작품 적용

1. 작품소개

1) 작품 개요

관상(Contemplation)의 구조적 특성에 기반한 소리합성과 실시간 시각화 알고리즘 연구를 이용한 <Paschal Resonance>는 2025년 11월 8일 동국대학교 이해랑 예술극장에서 진행된 한국 멀티미디어음악학회(SI MM)의 'SEEING SOUND LISTENING IMAGE(보는 소리, 듣는 영상) 2025' 공연에서 초연되었다.



[그림-32] 작품 <Paschal Resonance>의 공연 실황

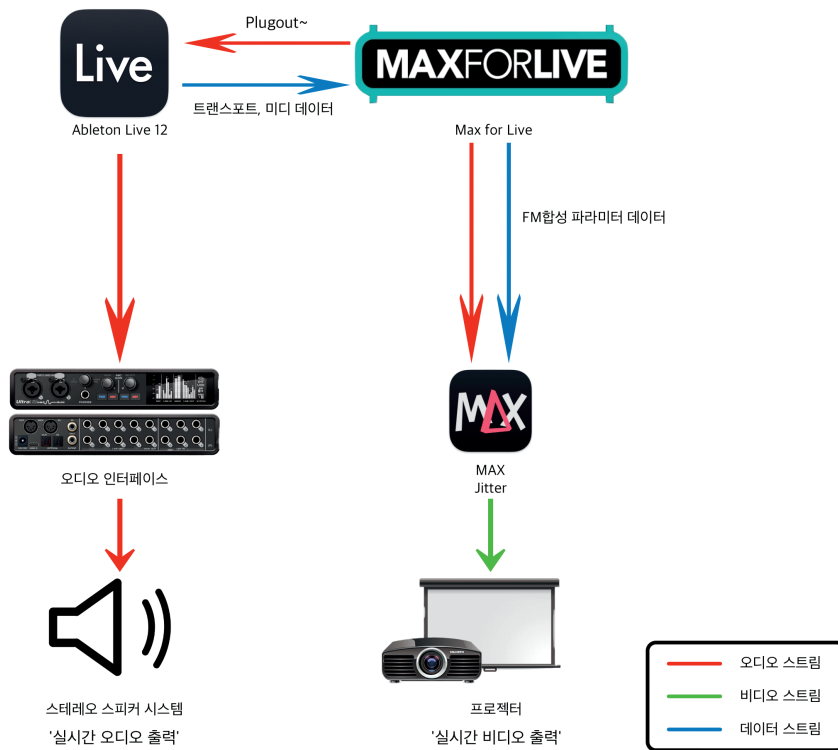
2) 작품 서술

본 작품은 연구자가 기도와 고요 속에서 마주해 온 미세한 내적 움직임, 소리와 영상이라는 외적 감각 구조로 옮겨보려는 탐구에서 출발한다. Paschal은 이러한 내면의 변화가 바깥 세계로 건너가는 순간을 은유하며, 'Resonance'는 그 과정에서 서로 다른 층위가 자연스럽게 맞물릴 때 생겨나는 울림을 가리킨다. 작품의 관심은 특정한 영적 상태를 묘사하거나 해석하는 데 있지 않다. 오히려 집중, 미세한 흔들림, 주변의 흐려짐과 중심의 형성 같은 관상적 구조가 기술적 알고리즘 속에서 어떤 방식으로 다시 조직되고 감각화되는지를 실험하는 데 있다. FM 합성, 실시간 좌표 생성, 그리고 시각적 변환 알고리즘은 이러한 구조적 특성을 각기 다른 방식으로 드러내는 매개로 작동한다. FM 합성에서 두 신호가 일정한 비율로 맞물릴 때 명료한 배음이 형성되듯, 작품 또한 내적 감각의 작은 리듬과 알고리즘의 계산 구조가 순간적으로 일치하는 지점을 공명의 형태로 드러낸다. 관람자는 이러한 일치가 빚어내는 소리와 빛의 흐름을 통해, 관상적 경험의 구조를 직관적 방식으로 체감하게 된다. 따라서 관상에서 발견되는 구조적 패턴을 기술적 언어로 번역하여, 내면의 미세한 변화가 외부적 진동과 어떻게 연결될 수 있는지를 탐구하는 장이다. 이는 신앙적 맥락에 익숙한 이들에게는 새로운 감각적 해석을 제시하고, 기술적 관점에서는 인간 내면의 리듬을 알고리즘이라는 구조 속에서 재조직하는 하나의 실험이 된다.

2. 작품 구성

1) 시스템 구성

본 작품은 음악 신호와 시각적 정보를 모두 실시간으로 처리하여 무대에 출력하는 형태로 구성된다. 이를 위해 [그림-33]과 같이 Ableton Live, M4L, 그리고 Jitter가 서로 연동되는 하나의 통합 시스템을 사용하였다. 전체 흐름은 다음과 같이 이해할 수 있다.



[그림-33] 실시간 음향 및 시각화 통합 시스템 구성도

우선, Ableton Live에서 MIDI 채널에 미리 입력된 미디 데이터를 멀티채널 폴리모듈레이션 FM합성 디바이스로 전달한다. 이때 Ableton Live는 단순히 소리를 출력하는 역할을 넘어서, 작품 전체의 “시간 흐름”을 관리하는 중심 도구가 된다. Ableton Live 내부의 M4L 장치는 이러한 음악 신호를 받아 두 가지 방향으로 나누어 처리한다. 하나는 실제 스피커로 출력하기 위한 오디오 스트림이며, 다른 하나는 시각화를 위해 필요한 데이터인 CC11: expression, 시간축(x)과 음정(y)축으로 분기 되어진 MIDI 노트 데이터를 실시간으로 Jitter로 전달하는 정보 스트림이다. M4L은 **Plugsend** 객체를 통해 오디오 신호(au, au2)를 Jitter로 전달한다. 이렇게 분리된 데이터는 곧바로 Jitter의 시각화 모듈로 유입된다. Jitter는 전용 패치를 통해 전달받은 신호를 기초로 두 가지 주요 시각 계층을 생성한다. 하나는 FM합성 신호의 위상과 진폭 변화를 기반으로 그려지는 선형 패턴이고, 다른 하나는 리사주 곡선과 비선형 좌표 변환을 활용하여 만들어지는 운동적 패턴이다. 최종적으로 무대 앞 프로젝터로 출력된다. 동시에 Ableton Live 에서 출력된 음악 신호는 오디오 인터페이스를 거쳐 스테레오 스피커 시스템으로 재생된다.

2) 사운드 및 영상 구성

① 사운드 기술 적용

작품에서 사용된 멀티채널 폴리모듈레이션 FM합성 시스템은 Ableton Live 환경에서 다음과 같은 방식으로 작동한다. OP1 트랙에는 연구자가 M4L로 제작한 FM합성 디바이스가 배치되어 있으며, 이 디바이스는 하나의 캐리어와 세 개의 모듈레이터(OP2, OP3, OP4)로 구성된다. 각 모듈레이터는 독립된 MIDI 채널(Ch__2 OP2, Ch__3 OP3, Ch__4 OP4)을 통해 [그림-34]와 같이 OP1 트랙으로 전달되며, 이 구조를 통해 모듈레이터들은 서로 다른 시간 흐름과 표현 곡선을 지닌 독립적인 모듈레이션 소스(modulation source)로 기능한다.



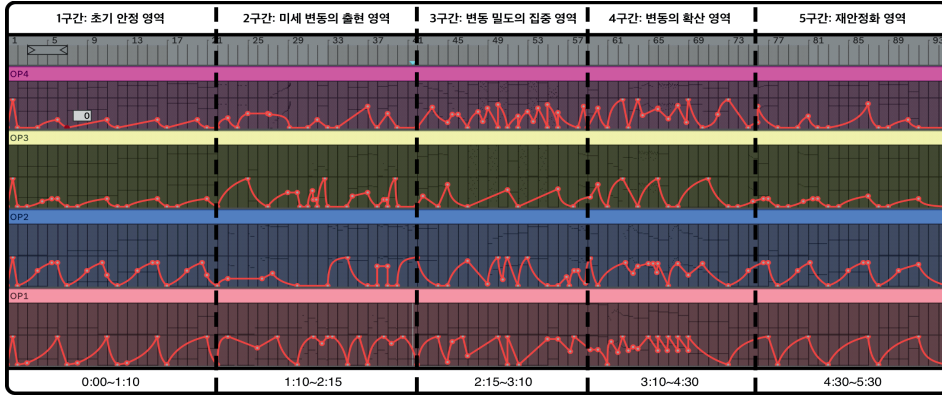
[그림-34] 각 오퍼레이터별 독립된 MIDI 입력 구조

특히 이 작품에서 중요한 역할을 하는 파라미터는 CC11: expression 이다. 일반적으로 Ableton Live에서는 MIDI 클립 내부에 오토메이션(automation)을 그려 사용하지만, 본 시스템에서는 이러한 방식을 사용하지 않았다. 대신 [그림-35]와 같은 Ableton Live의 기본 MIDI 효과인 “CC Control”을 활용하여 CC11을 사용자 정의 파라미터로 매핑하고, [그림-36]과 같이 이를 트랙 오토메이션으로 제어하였다.



[그림-35] Ableton Live의 CC control 미디 이펙트

이러한 설계는 각 모듈레이터가 고유한 CC11: expression 곡선을 따라 움직일 수 있게 하여, FM합성의 핵심인 비선형 스펙트럼 변조를 세밀하게 조정할 수 있는 환경을 제공한다. OP1의 FM합성 디바이스는 이렇게 들어오는 네 개의 데이터 흐름인 캐리어와 세개의 모듈레이터 통합하여 최종 음향을 생성한다. 모듈레이터들의 CC11: expression 곡선은 [그림-37]과 같이 시간에 따라 실시간으로 변조 지수를 변화시키고, 그 결과 생성되는 스펙트럼의 구조는 지속적으로 확장·수축하며 복잡한 음색 변화를 만든다.



[그림-36] OP1-OP4의 독립적 CC11: expression 오토메이션

DAW의 어레인지먼트 윈도우에 나타나는 여러 CC11: expression의 오토메이션 곡선은 이러한 미세한 변화 과정을 직관적으로 보여준다.

② 관상적 시간성에 따른 시스템의 상태 전이와 구조 분석

본 작품은 전통적인 음악 형식 분석에서 전제되는 A-B-C와 같은 단절된 곡 구성에 기반하지 않는다. 대신 하나의 시스템 상태가 시간에 따라 점진적으로 변형되고 재조직되는 과정을 중심으로 한 비단절적 시간 구조를 따른다. 따라서 본 연구에서는 작품의 시간 전개를 ‘곡의 부분’이 아닌, FM 합성 시스템 내부 파라미터 흐름의 상태 전이(state transition)로 설명한다. 이러한 접근은 관상적 기도에서 나타나는 시간 경험이 사건의 연속이 아니라, 중심의 안정 위에 미세한 변동이 누적되는 과정으로 인식된다는 점과 구조적으로 상응한다. 본 작품의 시간 구성은 다음의 다섯 개 구간으로 구분할 수 있으며, 이는 청각적 사건의 배열이 아니라 시스템 내부의 변조 밀도와 파라미터 상호작용 양상의 변화에 따른 구간화이다.

가. 1구간: 초기 안정 영역

이 구간에서는 캐리어를 중심으로 한 FM 합성 구조가 비교적 낮은 변조 밀도를 유지한다. 각 모듈레이터의 CC11: expression 값은 완만한 곡선을 이루며, 스펙트럼 변화 역시 제한된 범위 내에서 유지된다. 청취자는 명확한 사건이나 극적인 변화보다는 하나의 중심이 형성된 상태를 인식하게 되며, 영상에서는 각 오퍼레이터의 에너지가 색의 농담과 밝기로 서서히 드러나기 시작한다.

나. 2구간: 미세 변동의 출현 영역

시간이 경과함에 따라 각 모듈레이터의 CC11: expression 곡선에 불규칙성이 점진적으로 나타난다. 이 변화는 급격한 전환이 아니라, 기존 안정 상태 내부에서 발생하는 미세한 흔들림의 형태로 누적된다. 스펙트럼은 점차 세분화되며, 영상에서는 라인 드로잉이 시간 축을 따라 중첩되기 시작하여 내부 움직임이 가시화된다.

다. 3구간: 변동 밀도의 집중 영역

이 구간은 모듈레이터 간 비동기적 변조가 가장 높은 밀도로 집중되는 단계이다. CC11: expression 값의 변화 폭과 속도가 모두 증가하며, 스펙트럼의 응축과 확장이 동시에 발생한다. 청취 경험은 명확한 방향성을 갖기보다는 복수의 미세한 변화가 중첩된 상태로 인식되며, 영상에서는 선의 누적이 복잡한 구조를 형성하고 리사주 패턴 역시 빠르게 변형된다.

라. 4구간: 변동의 확산 영역

변동의 밀도는 점차 분산되며, 이전 구간에서 축적된 복잡성이 서서히 풀어지는 양상을 보인다. CC11: expression의 변화는 다시 완만해지고, 스펙트럼은 특정 영역으로 수렴하기 시작한다. 영상에서는 선의 밀도가 감소하며, 전체 시각 구조가 다시 균형을 회복하는 과정이 드러난다.

마. 5구간: 재안정화 영역

마지막 구간에서는 시스템 전체가 초기의 중심적 안정 상태로 회귀한다. 다만 이는 단순한 반복이 아니라, 이전 시간 동안 누적된 변형의 흔적을 포함한 상태이다. 청취자는 사건의 종결이라기보다 하나의 긴 시간 흐름이 정착되는 느낌을 경험하게 되며, 영상 또한 누적된 흔적 위에서 안정된 패턴을 유지한다. 아래 <표-2>는 이러한 시간 구성과 각 구간의 기술적·감각적 특징을 요약한 것이다.

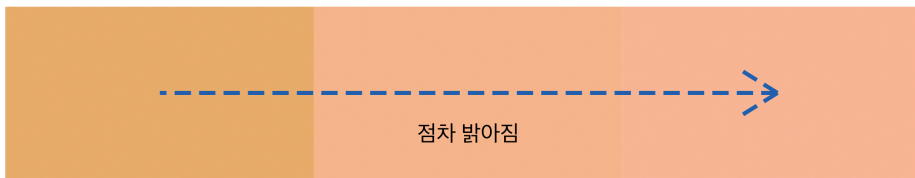
〈표-2〉 시스템 상태 전이에 따른 구간별 기술적·감각적 특성 분석

구분	1구간: 초기 안정 영역	2구간: 미세 변동의 출현 영역	3구간: 변동 밀도의 집중 영역	4구간: 변동의 확산 영역	5구간: 재안정화 영역
CC11: expression	완만한 곡선의 변화, 낮은 변조 밀도 유지	점진적 불규칙성 출현, 미세한 흔들림 누적	높은 변조 밀도, 변화 폭 및 속도의 최대화	변조 폭의 감소 및 변화의 완만화	안정적 수렴 및 초기의 중심성 회복
스펙트럼 밀도	낮음 (제한된 범위 내 유지)	점진적 증가 (스펙트럼의 세분화)	최대 밀도 (응축과 확장의 동시 발생)	감소 (특정 영역으로의 수렴)	안정 상태 (변형의 흔적을 포함한 정착)
청취 경험	중심 형성 및 단일 상태 인식	미세한 흔들림과 내부 움직임 감지	복합적 변화의 중첩, 비방향성적 인식	복잡성의 해소, 완화와 확산의 경험	정착된 시간감, 긴 흐름의 마무리
시각적 특성	색의 농담과 밝기로 에너지가 서서히 발현	라인 드로잉의 중첩 및 가시화 시작	복잡한 선 구조 형성, 리사주 패턴의 빠른 변형	선의 밀도 감소 및 구조적 균형 회복	누적된 흔적 위에서의 안정된 패턴 유지
타임라인	0:00~1:10	1:10~2:15	2:15~3:10	3:10~4:30	4:30~5:30

이러한 시간 구성은 음악적 사건의 배열이나 형식적 대비를 목적으로 하지 않는다. 대신 관람자는 소리와 영상이 만들어내는 변화가 특정한 ‘순간’을 강조하기보다, 하나의 내적 시간 흐름이 외부로 확장되는 과정을 경험하게 된다. 이로써 본 작품은 결과 중심의 감상이나 서사적 전개 대신, 변화가 생성되고 누적되며 다시 안정으로 회귀하는 구조 자체를 감각하게 하는 시간 기반 예술의 한 형태로 작동한다. 이와 같은 구성은 본 연구에서 제안한 멀티채널 폴리모듈레이션 FM 합성과 실시간 시각화 시스템이 단순한 기술적 도구가 아니라, 공연의 시간성과 감각적 경험을 직접 조직하는 내부 구조로 기능함을 보여준다. 즉, 기술은 작품을 설명하기 위한 외부적 수단이 아니라, 관상의 시간성을 소리와 영상 안에서 실제로 작동시키는 핵심 장치로 위치한다.

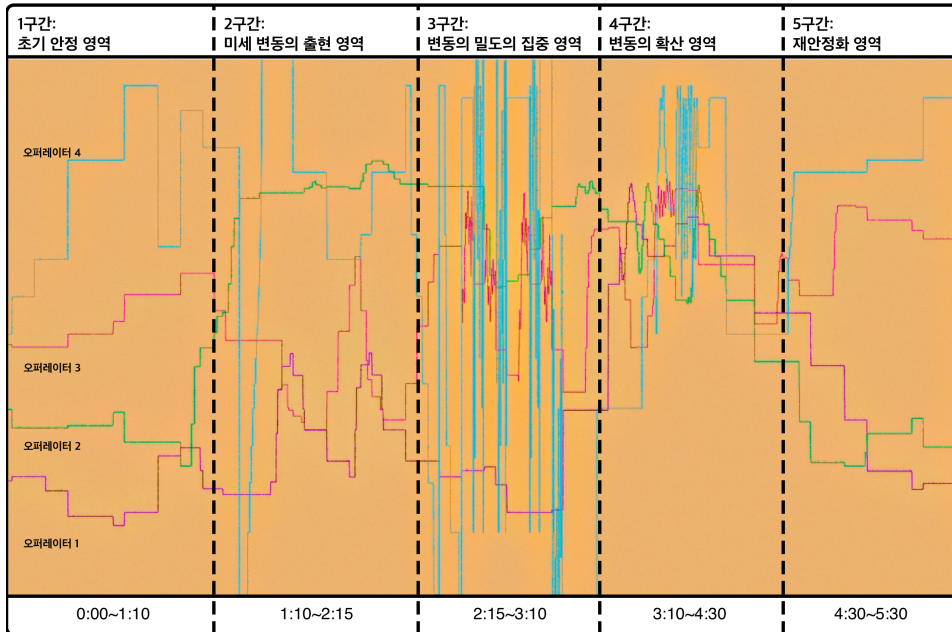
③ 영상 기술 적용

본 작품의 영상은 여러 개의 데이터 계층이 단순히 병렬로 나열된 구조가 아니라, 시간의 흐름 속에서 서로 겹치고 스며드는 하나의 시각적 과정으로 작동한다. 화면에 나타나는 색, 선, 패턴, 움직임은 따로 떼어 설명되는 기능이 아니라, 모두 FM합성 내부의 변화가 시간 축 위에서 서로 영향을 주고받으며 생성되는 결과다. 공연이 시작되면 [그림-38]과 같이 먼저, 각 오퍼레이터의 에너지가 색의 농담과 밝기로 서서히 드러난다.



[그림-37] 점진적인 색상의 변화

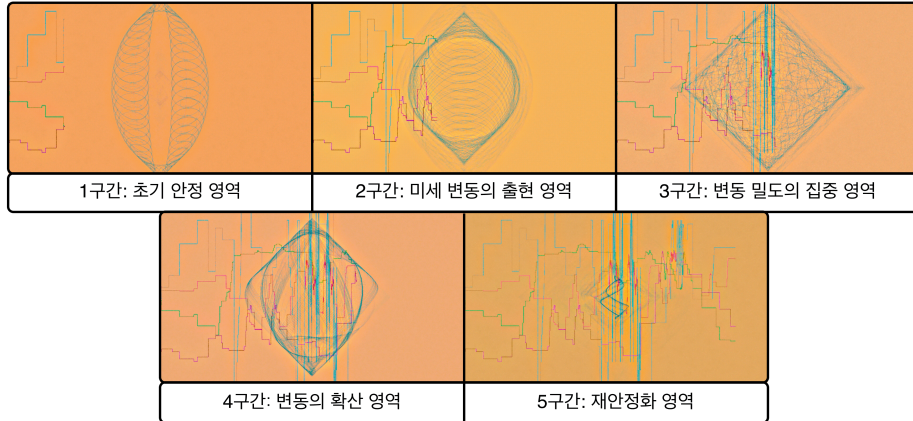
[그림-38]의 시각화는 FM합성의 파라미터 흐름이 시간에 따라 어떻게 구조적으로 변화하는지를 다섯 개의 구간별로 나누어 보여준다.



[그림-38] 시간에 따른 라인드로잉의 5단계 변화 구조

1구간은 전체 시스템의 ‘초기 안정 영역’으로, 캐리어와 모듈레이터의 출력 변화가 비교적 낮은 밀도를 유지하는 단계이다. 2구간에서는 ‘미세 변동의 출현’이 나타나며 각 오퍼레이터의 CC 데이터가 점진적으로 불규칙성을 띠기 시작한다. 3구간은 변동이 가장 높은 밀도로 집중되는 영역으로, 스펙트럼의 응축과 복잡도가 뚜렷하게 증가한다. 4구간에서는 이러한 변동이 ‘확산’되며 밀도가 다시 균형을 찾아가는 과정이 나타난다. 마지막 5구간은 전체 파라미터 흐름이 일정한 안정 상태로 회귀하는 ‘재안정화 영역’으로 구성된다. 이렇게 누적된 선의 흐름은 시간이 지날수록 하나의 거대한 “움직임의 지도”를 만들며, 단일한 사건이 아니라 지속적이고 층위화된 시간의 흔적을 만든다. 이와 동시에 좌·우 위상 차이를 기반으로 한 리사주 패턴이 화면의 중심에서 유기적으로 변형된다. 회전하거나 진동하고, 때로는 타원형에서 복잡한 곡

선 구조로 변화하며, 소리 내부의 위상 구조가 어떻게 흔들리고 확장되는지를 [그림-40] 처럼 그대로 보여준다.



[그림-39] 구간에 따른 세 시각화 계층의 통합 변화

이 세 흐름(색의 진동, 선의 기록, 위상 패턴의 변화)은 서로 독립된 층을 유지하면서도, 시간이 흐름에 따라 자연스럽게 하나의 장면으로 녹아든다. 각각의 요소가 따로 “보여지는 효과”가 아니라, 하나의 내적 시간 흐름이 외부로 확장되며 생기는 통합된 시각 경험인 셈이다. 관람자는 화면에서 일어나는 모든 변화가 사운드 내부의 움직임에 정직하게 반영하고 있음을 직관적으로 감지할 수 있다. 결과적으로 영상 시스템은 관상의 시간성이 갖는 “느림, 미세한 파장, 반복, 수축과 확장”을 하나의 장면 위에서 지속적으로 새겨내는 장치로 작동한다. 이는 특정 이미지를 재현하는 시각 효과가 아니라, 소리 내부의 구조가 시간 속에서 어떻게 살아 움직이는지를 그대로 드러내는 하나의 시각적 흐름이다.

본 장에서는 앞서 설계한 멀티채널 폴리모듈레이션 FM 합성과 실시간 시각화 구조가 작품 안에서 실제로 어떻게 적용되고 작동하는지를 살펴보았다. 여기서 연구 기술은 작품을 설명하기 위한 외부적 이론이

아니라, 공연의 시간 전개와 감각적 경험을 직접 형성하는 내부 구조로 기능한다. 사운드 측면에서 FM 합성 시스템은 하나의 캐리어를 중심으로 여러 모듈레이터가 서로 다른 MIDI 채널과 CC11: expression 흐름을 통해 비동기적으로 작동하도록 구성되었으며, 이로 인해 음향 구조는 선형적 진행이나 단일한 음색 변화가 아닌, 중심의 안정 위에 주변의 미세한 변동이 지속적으로 누적되는 상태를 유지한다. 영상 시스템 역시 사운드의 결과 이미지를 장식적으로 재현하는 방식이 아니라, 에너지·시간·위상이라는 서로 다른 데이터 층위를 실시간으로 분리하고 재조합하는 계층적 인터페이스로 설계되었다. 라인 드로잉, 리사주 패턴, 배경색의 변화를 중심으로 한 시각 구조는 공연 시간의 흐름에 따라 중첩과 소거를 반복하며, FM 합성 내부에서 발생하는 질서와 변형을 시각적 층위로 드러낸다. 이처럼 본 연구에서 제안한 기술적 구조들이 실제 공연 환경 속에서 하나의 통합된 시스템으로 작동하는 과정을 보여주는 적용 사례로 구성되었으며, 연구 기술이 이론적 설계에 머무르지 않고 시간 기반 예술의 조건 안에서 유지되고 변형되는 방식을 확인하는 단계로 위치한다.

IV. 결론

가톨릭 영성 전통의 ‘관상’이 지닌 구조적 특성을 현대 전자음향과 실시간 시각화 알고리즘으로 모델링할 수 있는가. 본 연구는 이 근원적인 물음에서 출발하였다. 이는 관상의 신비적 체험이나 종교적 도그마(Dogma)³⁸⁾를 재현하려는 시도가 아니라, 기도를 가능하게 하는 내적 메커니즘(중심의 안정, 주변의 미세 변동, 지연된 시간성, 비단선적 흐름)이 기술적 시스템 안에서 구조적으로 성립 가능한지를 검증하려는 공학적·미학적 실험이었다. 연구 과정에서 마주한 가장 본질적인 난제는 관상의 구조를 추상적 개념에 가두지 않으면서도, 이를 단순한 감상적 표현으로 타협시키지 않는 균형점을 찾는 것이었다. 특히 ‘중심의 안정’을 구현하기 위해 초기에 도입한 단순 드론(Drone)³⁹⁾ 구조는 관상의 고요를 형상화하기에는 적절한 출발점이었으나, 그 내면에 잠재된 미세한 의식의 파동을 표현하기에는 청각적 해상도가 부족했다는 사실이 확인되었다. 단일한 지속음은 관상의 외형적 ‘정적 상태’를 묘사할 수 있지만, 기도자가 경험하는 ‘역동적 정적 상태’ 즉, 침묵 속에서도 끊임없이 깨어 있는 주의력과 미세한 내적 지향을 담아내기에는 시간적·스펙트럼적 밀도가 낮았기 때문이다. 이러한 한계는 관상이 단순한 소리의 부재나 정지가 아니라, 고도의 감각적 해상도로 포착되어야 할 역동적 사건임을 시사한다. 이러한 논리적 결함을 극복하기 위해 본 연

38) 권위 있는 기관이나 집단에 의해 확립된, 의심의 여지가 없는 진리나 원칙. 종교적 맥락에서는 교회의 공식적인 교의(敎義)를 의미하며, 본고에서는 연구의 범위를 특정 종교적 신념의 재현이나 교조적 선포가 아닌 구조적 분석으로 한정하기 위해 사용함.

39) 음악적 맥락에서 길게 지속되는 단일한 음조 혹은 화음. 본고에서는 관상의 고요를 형상화하기 위해 도입되었으나, 초기 모델에서 '시간적 정체'라는 기술적 한계를 드러낸 정적 지속음을 지칭함.

구가 채택한 멀티채널 폴리모듈레이션 FM합성 방식은 본질적인 전환점이 되었다. 단일 캐리어를 중심축으로 삼고 세 개의 모듈레이터를 비동기적으로 작동시킨 설계는 중심의 정체성을 유지하면서도 주변부의 미세한 흔들림을 공존시켰다. 여기서 본 연구가 도달한 가장 핵심적인 발견은 다음과 같다. 관상의 ‘중심’은 고정된 주파수나 정적인 소리에 존재하는 것이 아니라, 복잡한 변조 관계가 서로를 지탱하며 붕괴를 지연시키는 ‘안정적 상태 전이’ 그 자체에 존재한다. 즉, 관상은 정적 상태가 아니라, 시스템이 해체되기 직전의 임계 영역에서 유지되는 동적 질서임을 확인하였다. 실시간 시각화 알고리즘 또한 이러한 발견을 뒷받침하도록 재조정되었다. 초기의 시각화가 데이터를 과도하게 노출해 분석적 정보로 분산되었던 실패를 통해, 시각화를 ‘장식’이 아닌 ‘지각의 닻(perceptual anchor)⁴⁰⁾’으로 재정의하였다. 위상 데이터를 최소한의 정보로 정제하여 제공함으로써, 시각화는 소리의 변화를 설명하는 도구를 넘어 청취자가 관상적 몰입을 유지할 수 있도록 돕는 투명한 배경으로 수렴하였다. 이는 관상의 조건인 ‘집중을 방해하지 않는 가시성’이 단순한 정보의 부재가 아니라, 감각 간의 위상 동기화를 통한 고도의 정렬 상태임을 시사한다. 본 연구의 결과물인 <Paschal Resonance>는 이러한 조율과 실패의 기록을 담은 실험 장치이다. 이 작품은 관객에게 특정한 영적 메시지를 강요하지 않는다. 대신, 관상의 시간성이 단순히 ‘느낌’에 있는 것이 아니라, 시스템 내부의 미세한 변화를 감지하는 임계값이 낮아진 상태(고도의 감각적 해상도)에 있음을 감각적으로 제시한다. 청취자는 수동적인 감상자가 아니라, 붕괴 직전의 안정 영역에서 발생하는 미세한 변이를 포착하고 자신의 내면과 조응시키는 능동적 주체로 위치한다. 결론적으로 본 연구의 의의는 관상을 추상적

40) 인지 심리학 및 HCI 분야의 용어로, 복잡한 정보 흐름 속에서 지각의 방향을 잡도록 돕는 참조점(Reference Point). 본고에서는 시각 요소가 청취자의 감각적 몰입을 지탱하는 기준점으로 기능함을 의미함.

상징으로 소비하는 태도를 지양하고, 시스템 설계 과정을 통해 그 구조적 대응성을 검증했다는 데 있다. 기술적 시스템이 영적 도약을 완벽히 포착하는 것은 불가능하다.

그러나 본 연구는 바로 그 ‘기술적 번역의 불완전함’이야말로 관상의 본질(끊임없는 조정과 깨어 있음)에 더 가까이 다가가는 실제적 접점을 드러내었다. 관상의 구조는 기술과 만날 때 공명하고 어긋나며, 바로 그 불완전한 균형의 지점이 본 연구가 도달한 가장 정직한 결론이다.

Keyword(검색어)

가톨릭(Catholic), 관상(contemplation), 컴퓨터음악(computer music), 사운드 시각화(sound visualization) 인터랙티브 멀티미디어 음악(interactive multimedia music), 전자음악(electronic Music), Ableton Live, Max, Jitter, 실시간 사운드 프로세싱(real-time sound processing)

E-Mail: godammkim@gmail.com

참 고 문 헌

1. 단행본, 학술지

Alessandro Cipriani, & Maurizio Giri. (n.d.), 「Electronic Music and Sound Design - Theory and Practice with Max 8」, (Contemponet, 2019)

Rumsey, Francis, and Tim McCormick., 「Sound and Recording: An Introduction. 7th ed.」, (Focal Press, 2014)

Curtis Roads, 「The Computer Music Tutorial, second edition」, (MIT Press, 2023)

Martin Russ, 「Sound Synthesis and Sampling」, (Routledge, 2003)

Brian K. Shepard, 「Refining Sound: A Practical Guide to Synthesis and Synthesizers」, (Oxford University Press, 2013)

Robert Sherlaw Johnson, 「Messiaen」, (University of California Press, 2009)

교황 베네딕토 16세(요제프 알로이스 라칭거), 「전례의 정신」, (성바오로출판사, 2006)

마티우스 아우제, 장신호 · 윤종식 옮김, 「전례란 무엇인가」, (가톨릭 대학교출판부, 2022)

예수의 성녀 데레사, 최민순 옮김, 「영혼의 성」, (바오로딸, 2024)

캐슬린 하먼, 이상철 옮김, 「전례음악의 신학」, (가톨릭대학교출판부, 2022)

토마스 아퀴나스, 안소근 옮김 「활동과 관상」 (한국성토마스연구소, 2025)

토마스 머튼, 오지영 옮김, 「새 명상의 씨」, (가톨릭출판사, 2023)

한국천주교중앙협의회, 「가톨릭 교회 교리서」 (한국천주교중앙협의회, 2008)

한국교회사연구소, 「한국가톨릭대사전」, (한국교회사연구소, 2006)

2. 참고논문

김영민, 「전자음악의 예술적 정의와 지향성 연구」, 동국대학교 박사 학위논문, 2025

김요한, 「막형 전위차계와 압력 센서를 활용한 인터랙티브 전자악기 제작 및 공연 연구」, 동국대학교 석사학위논문, 2025

문희자, 「토머스 머튼의 신비주의와 신비체험, 그 실천적 함의 연구」, 서강대학교 석사학위논문, 2020

오희원, 「노이즈 알고리즘에 기반한 오디오비주얼 인터랙션 시스템 디자인 연구」, 동국대학교 석사학위논문, 2022

정신실, 「기도 안에서의 자기인식과 영적 변화에 대한 연구: 『영혼의 성』을 중심으로」, 가톨릭대학교 석사학위논문, 2024

조현필, 「토마스 머튼의 영성에 대한 고찰」, 대구가톨릭대학교 석사학위논문, 2022

3. 웹사이트

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

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

가톨릭 교리서: <https://ebook.cbck.or.kr/gallery/view.asp?seq=214791>

https://en.wikipedia.org/wiki/Teresa_of_%C3%81vila#Interior_Castle

https://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Merton

https://en.wikipedia.org/wiki/Lissajous_curve

ABSTRACT

A Study on Sound Synthesis and Real-Time
Visualization Algorithms Based on the Structural
Characteristics of Contemplation:
Focusing on the Multimedia Work <Paschal Resonance>

KIM, TAEWON

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

This research translates the Catholic spiritual tradition of contemplation into the language of electronic sound synthesis and real-time visualization. Instead of treating contemplation as a theological narrative, the study isolates its fundamental structural

logic. Key elements such as inner silence, centered stability, micro-fluctuations, and non-linear temporality are identified and utilized as core design principles. To implement these qualities acoustically, a multi-channel poly-modulation FM synthesis system was developed in Max for Live (M4L). The system uses a single carrier to represent a stable central axis, while multiple asynchronous modulators generate subtle peripheral variations. By incorporating stereo oscillator drift and phase modulation, the sound engine produces a controlled decorrelation, allowing for a spectral movement that is dynamically restrained. The visual system, built with Jitter, functions as an analytical interface rather than a simple illustration. It maps acoustic data into three distinct layers: energy-based color dynamics, time-driven line drawings, and phase-based Lissajous patterns. The Lissajous figures are particularly significant as they visualize the invisible phase relationships within the synthesis engine. These technical explorations culminate in the multimedia work *Paschal Resonance*. This piece demonstrates that the abstract experience of contemplation can be objectified through algorithmic design, proposing an aesthetic framework where spiritual and technological systems meet through structural resonance.

부록 : 첨부 DVD 설명

1. Paschal Resonance 공연 영상

2025년 11월 8일 멀티미디어작품 <Paschal Resonance>

2. Paschal Resonance 자료

작품에 사용된 MAX 패치 자료