

---

# 공간 채움 곡선을 이용한 자동 음열 음악 작곡 방법

## Automatic Generation of Serial Music Using Space-Filling Curves

유민준, Min-Joon Yoo\*, 이인권, In-kwon Lee\*\*

---

**요약** 음열 음악은 쇤베르크가 창시한 20세기 음악의 중요한 작곡 기법 중 하나이다. 이 음악은 범조적인 혹은 무조적인 특징을 가지며, 이로 인하여 독특한 현대 음악의 분위기를 생성하게 된다. 본 논문에서는 수학적 알고리즘을 이용하여 음열 음악을 생성하는 방법을 제안하고자 한다. 본 논문에서 소개하는 방법은 음열음악에 대한 쇤베르크의 엄격한 정의보다는 더욱 자유로운 형태를 띠지만, 전체 음악 내에서 12개의 음이 사용되어야 한다는 규칙은 만족한다. 이를 위하여 원형 음열 및 원형 음열의 전위와 전조로 구성되어있는 음열도표를 자유롭게 탐색하는 공간 채움 곡선을 이용한다. 임의의 공간을 한번만 탐색하는 성질을 가진 이 곡선을 사용함으로써, 음열 도표에 있는 모든 음을 한번씩 사용하면서도 적절한 반복성을 띠는 음악을 생성할 수 있다. 따라서 생성된 음악은 원래의 음열 음악의 특징인 범조성 및 무조성을 유지하면서도 현대음악에 친숙하지 않은 사람들에게도 보다 쉽게 접근하는 음악을 생성할 수 있다는 장점이 있다. 또한 다차원 공간 채움 곡선을 이용하여 음의 길이 및 세기까지 음열을 사용하는 더욱 확장된 형태의 음열음악을 생성하는 방법도 소개한다.

**Abstract** Serial Music, introduced by A.Schönberg, is a one of the important composition techniques. This music style has features of pantonality and atonality, so it generates unique atmosphere of modern music. In this paper, we introduce a method of generating serial music using mathematical algorithm. This method generates music that satisfy the requirement that the number of pitches belonged to each pitch class are exactly same, though the requirement is less strict than Schönberg's definition. To do this, our method uses space-filling curves traversing the twelve tone matrix, which is constructed by the serial series, its inversion and its transpose. Using these curves, we can generate a music that has all notes in the matrix exactly once and adequate repeatness because of the curve's locality. Result music, therefore, can be more suitable for people that are not familiar with modern music, while maintaining the features of pantonality and atonality. This paper also introduces a method of generating extended serial music that uses serialism of duration and dynamic of notes, using multi-dimensional space-filling curves.

**핵심어:** 음열 음악, 공간 채움 곡선, 자동 작곡, 알고리즘 작곡

**Keywords :** Serial Music, Space-filling curve, automatic composition, algorithmic composition.

---

본 논문은 문화관광부 및 한국문화콘텐츠진흥원의 문화콘텐츠기술연구소(CT) 육성사업의 연구결과로 수행되었음.

\*주저자 : 연세대학교 컴퓨터학과 박사과정 e-mail: debussy@cs.yonsei.ac.kr

\*\*교신저자 : 연세대학교 컴퓨터학과 교수 e-mail: iklee@yonsei.ac.kr

## 1. 서론

음열 음악(serial music) 혹은 12음 기법(twelve tone)은 쇤베르크(A. Sch nberg)가 창시한 20세기 현대음악의 주요한 작곡 기법중 하나로서, '어떤 음이 반복되기 전에 모든 12음이 사용되는 음악' 을 뜻한다. 따라서 이 음악은 범조성(pantonomy) 혹은 무조성(atonality)이 곡 전체에 유지되게 되며, 기존의 음악과는 다른 분위기의 음악이 생성되게 된다 [1,2].

전체 곡 안에서 반음계의 12음 모두가 같은 빈도로 사용되어야 하기 때문에 음열음악의 작곡은 무척 어려운 일이다. 따라서 음열 음악의 작곡을 보다 용이하게 하기위해 쇤베르크가 도안한 음열도표(twelve tone matrix)가 사용될 수 있다. 이는 작곡가가 결정한 한가지 음열에 대한 전위, 전조등을 이용하여 만든 하나의 도표로서, 작곡가는 이 도표를 참고하여 음열 음악을 만들게 된다. 하지만 음열도표는 작곡의 용이성을 돕기 위하여 사용되는 수단으로 사용될 뿐, 높은 수준의 음열 음악을 생성하기 위해서는 작곡가의 사려깊은 음열의 배열과 리듬, 화성적인 고려가 있어야 한다.

본 논문에서는, 수학적 알고리즘을 통하여 자동으로 음열 음악을 작곡하는 방법을 제안한다. 이 논문에서 정의하는 음열 음악은 쇤베르크의 엄격한 정의와는 약간 다르게 '전체 음악에서 반음계의 12음의 개수가 동일하게 사용되는 음악' 으로 정의한다. 즉 본 논문에서 생성되는 음열음악은 어떤 음이 나온 후, 다시 이 음이 나오기 전에 다른 11개의 음이 모두 나올 필요는 없다. 하지만 음악 전체로 보면 반음계의 12개의 음은 모두 동일한 빈도로 사용되게 된다. 이는 원래의 음열 음악의 특징인 범조성 및 무조성을 일정수준 유지하면서도 현대음악에 친숙하지 않은 사람들에게도 보다 쉽게 접근하는 음악을 생성할 수 있다는 장점이 있다.

일반적으로 음열도표를 사용하여 음열 음악을 작곡할 때, 선형적인 순서로 음열을 이용하게 된다. 즉 한 가지 음이 나온 후 그 음을 다시 듣기 위해서는 11개의 나머지 음이 모두 지나가야 하며, 이는 음열 음악의 특징을 만들기도 하지만, 일반 사람들에게는 음열 음악이 난해한 음악처럼 들리는 이유가 되기도 한다. 본 논문에서는 기존과 같이 음열도표를 이용하여 음악을 생성하지만, 선형적인 움직임을 강요하지 않고, 자유롭게 움직이면서 각 음들을 탐색해가며 음악을 생성하게 된다. 이를 통하여 더욱 지역(local)적인 반복성이 나타나게 되며, 이는 반복적은 음악에 익숙해져있는 일반 사람들에게 더욱 친숙한 느낌을 느끼게 한다.

선형적인 움직임을 갖지 않으면서도 전체 곡에서 동일한 숫자의 12음이 사용되어야 한다는 엄격한 규칙을 맞추기 위하여 본 논문에서는 공간 채움 곡선(space-filling curve)를 사용하는 방법을 제안한다. 공간 채움 곡선은 일정한 넓이의 공간의 모든 포인트를 한 번씩 지나가는 곡선을 의미하며,

일반적으로 L시스템 혹은 프랙탈적인 성질을 지니고 있다. 다양한 공간 채움 곡선을 사용함으로써 같은 음열도표에서도 다른 음악이 생성될 수 있으며, 공간 채움 곡선의 특징인 지역성(locality)이 음악에 적용되어 어느정도 반복적인 패턴이 생성될 수 있다. 또한 이 곡선들 중에는 n차원으로도 확장이 가능한 곡선이 있기 때문에, 이를 이용하여 2차원 음열도표 뿐만 아니라 더 높은 차원으로 확장된 형태의 도표를 사용한 음악도 생성할 수 있다는 장점을 지닌다.

본 논문의 목적은 현대음악의 경험이 없는 일반 사람들에게도 일반 현대음악보다 덜 난해하면서도 현대음악이 가지고 있는 독특한 분위기를 전할 수 있는 음악을 알고리즘을 통하여 생성하는데에 있다. 이를 통하여 여러 멀티미디어 시스템에서 더욱 다양한 음악 소스를 사용할 수 있으며, 전반적인 멀티미디어의 수준을 발전시킬 수 있으리라 기대한다.

## 2. 음열도표

쇤베르크가 제안한 음열도표는 12개 음으로 구성되어있는 음열과 그 음열의 세 가지 변형들, 즉 전위, 역행, 전조를 포함하는 형태로 되어있다(그림 1).

	0	3	1	2	10	8	7	6	5	4	9	11
9	0	10	11	7	5	4	3	2	1	6	8	
11	2	0	1	9	7	6	5	4	3	8	10	
10	1	11	0	8	6	5	4	3	2	7	9	
2	5	3	4	0	10	9	8	7	6	11	1	
4	7	5	5	2	0	11	10	9	8	1	3	
5	8	6	7	3	1	0	11	10	9	2	4	
6	9	7	8	4	2	1	0	11	10	3	5	
7	10	8	9	5	3	2	1	0	11	4	6	
8	11	9	10	6	4	3	2	1	0	5	7	
3	6	4	5	1	11	10	9	8	7	0	2	
1	4	2	3	11	9	8	7	6	5	10	0	

그림 1 음열도표. 가장 첫 번째 행에는 원형 음열이, 첫 번째 열에는 원형 음열이 전위된 형태로 되어있으며, 나머지 행에는 각 행의 첫 번째 열의 음을 중심으로 원형 음열이 전조된 형태의 음열이 나열되어 있다.

음열도표의 가장 첫 행은 원형 음열(0)이 위치한다. 예를 들어 그림 1에서 원형 음열은 '0, 3, 1, 2, 10, 8, 7, 6, 5, 4, 9, 11' 형태를 띠고 있다(이 숫자는 피치 클래스(pitch class)를 의미하는 것으로, 예를 들어 0은 'C', 1은 'C#', 11은 'B'음을 가지는 음들의 집합을 나타낸다). 이 도표의 가장 첫 열에는 원형 음열의 전위형태(inversion 혹은 mirror)가



결과 음악을 생성하였다.

## 5. 다차원 확장

신베르크가 12음 기법을 제안한 이후, 이 기법은 그 이후의 여러 작곡가들을 통해, 단지 각 음들 뿐 만 아니라 음의 길이(duration)나 세기(dynamic)등도 음열의 형태를 갖는 형태의 음악 기법으로 발전하였다. 즉 한 음악 안에 나타나는 음들의 길이와 세기들도 짧은 길이부터 긴 길이까지, 혹은 아주 작은 세기부터 아주 큰 세기까지 동일하게 나타나는 형태의 작곡 기법들이 제안되었다.

본 논문에서 제안하는 방법을 이용하면 이러한 확장도 가능하다. 많은 공간 채움 곡선은 간단한 L시스템으로 반복적으로 구성이 가능하기 때문에, n차원으로 확장이 가능하다. 그림 3에서 3차원으로 확장된 Hilbert 곡선의 모습을 나타내었다. 음정들로 구성되어 있는 2차원 음열도표에서 3차원 축을 구성하여, 이를 음의 길이 혹은 세기로 매핑을 한 후 3차원 공간 채움 곡선으로 이 공간을 탐색하면, 음정 외에도 길이 혹은 세기가 변형되는 음악을 생성할 수 있다. 물론 길이와 세기를 각각 축으로 설정한 후 4차원 곡선을 이용하여 음의 길이 및 세기가 모두 음열적인 형태를 지닌 음악을 생성할 수도 있다.

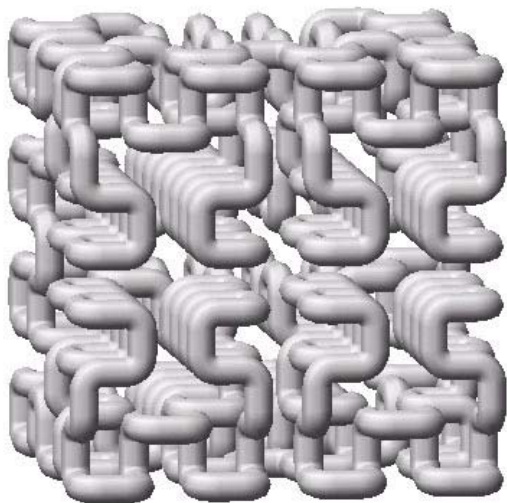


그림 4 3차원으로 확장된 Hilbert 곡선.

## 6. 실험 및 결과

본 논문에서 제안한 방법의 효율성을 비교하기 위하여, 다음과 같은 5가지 종류의 음악을 생성하여 비교하였다.

(1) 본 논문에서 제안한 Hilbert 곡선을 이용하여 생성한 음악(HLB).

(2) 음열도표에서 왼쪽→오른쪽으로 이동하면서 만나는 음을 이용하여 생성한 음악(FRW). 가장 첫 행·열에 위치한 음부터 시작한다. 이 경우 가장 오른쪽까지 이동하면 그 아래 행의 첫 번째 열로 이동한다. 원형 음열과 원형 음열의 전조된 형태의 음열이 연속적으로 나타나게 된다.

(3) 음열도표에서 위쪽→아래쪽으로 이동하면서 만나는 음을 이용하여 생성한 음악(INV). 가장 첫 행·열에 위치한 음부터 시작한다. 이 경우 가장 아래쪽까지 이동하면 그 오른쪽 열의 첫 번째 행으로 이동한다. 원형 음열의 전위된 형태와 그의 전조된 형태의 음열이 연속적으로 나타나게 된다.

(4) 음열도표에서 오른쪽→왼쪽으로 이동하면서 만나는 음을 이용하여 생성한 음악(RET). 가장 첫 행, 마지막 열에 위치한 음부터 시작한다. 이 경우 가장 왼쪽까지 이동하면 그 아래 행의 마지막 열로 이동한다. 원형 음열의 역행 형태와 그의 전조된 형태의 음열이 연속적으로 나타나게 된다.

(5) 음열도표에서 아래쪽→위쪽으로 이동하면서 만나는 음을 이용하여 생성한 음악(INV-RET). 가장 마지막 행·열에 위치한 음부터 시작한다. 이 경우 가장 위쪽까지 이동하면 그 왼쪽 열의 마지막 행으로 이동한다. 원형 음열의 전위된 형태의 역행과 그의 전조된 형태의 음열이 연속적으로 나타나게 된다.

본 논문에서 생성된 음악의 반복성을 체크해보았다. 엄밀한 의미의 음열음악은 ‘어떤 음이 반복되기 전에 모든 12음을 사용하는 음악’으로 정의하고 있지만, 본 논문에서는 ‘전체 음악에서 반음계의 12음의 개수가 동일하게 사용되는 음악’로 정의된 음열 음악을 생성한다. 따라서 본 논문에서 생성되는 음열음악은 어떤 한 음이 나온 후, 다른 11개의 음이 나오기 전에도 같은 음이 나올 수 있다. 그 정도를 측정하기 위하여, 임의의 음이 나온 후, 그 후에 같은 음이 나올 때 그 사이 안의 음의 개수를 세어보았다(그림 5).

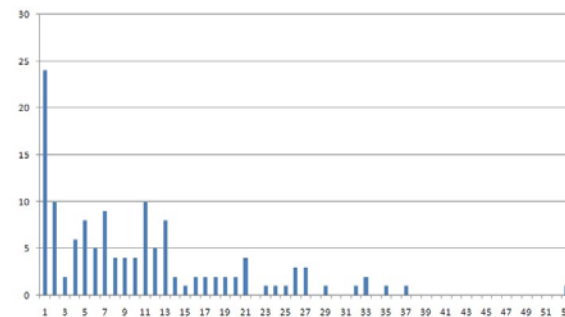


그림 5 2차원 Hilbert 곡선으로 생성된 음악에서, 임의의 음이 나온 후 다시 그 음이 나오는 사이에 존재하는 음의 개수 분포.

일반적인 형태의 음열음악(2-5)의 분포(그림 6)와 비교하면 상당히 다양한 분포를 나타내고 있으며, 특히 작은 크기(13미만)의 값이 많이 존재하는데, 이것은 Hilbert 곡선의



특징 중의 하나인 지역성(locality)을 보여주고 있다. 이 요소는 음악적으로는 반복성을 나타내게 된다.

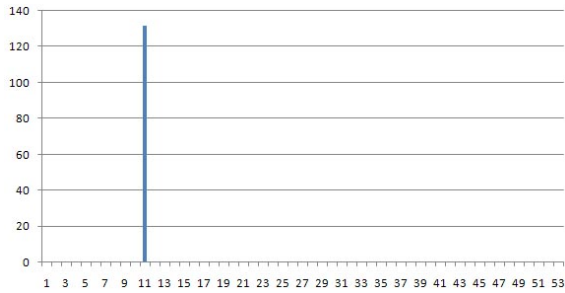


그림 6 일반적인 형태의 음열 음악에서, 임의의 음이 나온 후 다시 그 음이 나오는 사이에 존재하는 음의 개수 분포.

3차원 축을 음의 길이로 놓고 3차원 Hilbert 곡선을 이용하여 생성한 음악은 2차원 Hilbert 곡선으로 생성한 음악보다 더욱 더 음악적으로 들린다. 이는 다음과 같은 두 가지 이유로 볼 수 있다.

- 리듬감이 추가됨으로써 더욱 동적으로 느껴지는 음악적인 특징.
- 더욱 높은 지역성의 결과로 나타나는 반복적인 패턴에 대한 음악적인 특징.

3차원 Hilbert 곡선의 경우, 본질적으로 더욱 높은 지역성을 띄게 되며(그림 7) 이는 반복되는 패턴이 더욱 자주 나타난다는 의미이고, 이는 더욱 음악적인 느낌으로 느껴지게 된다.

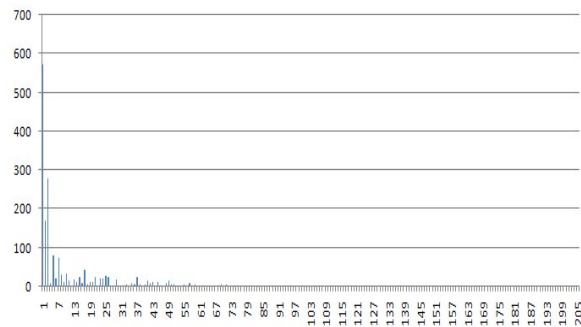


그림 7 3차원 Hilbert 곡선으로 생성된 음악에서, 임의의 음이 나온 후 다시 그 음이 나오는 사이에 존재하는 음의 개수 분포.

다음으로, 실제 음악을 들려주고 사용자에게 평가를 하게 하였다. 앞서 설명한 (1)~(5)방법으로 생성한 3곡의 음악을 일반적인 사람 10명에게 들려주고, 마음에 드는 순서대로 5점부터 1점까지를 매기도록 하였다. 원한다면 여러 횟수동안 듣는 것도 가능하게 하였다. 이는 본 논문의 목표가 일반사람들에게 더욱 쉽게 이해될 수 있는 음열음악을 생성하는 것을 목표로 삼고 있기 때문이다. 결과는 표 1과 같다.

종류	HLB	FRW	INV	RET	INV-RET
점수 평균	5.0	2.5	2.8	2.2	2.5

표 1 Hilbert 곡선으로 생성한 음악(HLB)과 일반적인 방법(FRW, INV, RET, INV-RET)로 생성한 음악에 대한 선호도 점수 평균

모든 경우에서 Hilbert 곡선으로 생성한 음악(HLB)이 가장 높은 선호도를 얻었다. 설문자 대부분은 이런 음악 자체가 생소하기 때문에 선호도를 측정하는 것이 쉽지 않다는 평이었으나, 전체적으로 Hilbert 곡선으로 생성한 음악이 더욱 안정적인 느낌이라는 점에 동의하였다. 또한 다른 방법으로 생성한 음악(FRW, INV, RET, INV-RET)의 경우 점수 차이가 크지 않았으며, 설문자마다 편차도 컸다. 이는 이러한 방법으로 생성한 음악은 사람들이 느끼기에 그 차이가 크지 않고, 선택된 음열에 따라서 차이가 생기기 때문이라고 생각한다.

또한 Hilbert 곡선으로 생성한 음악을 듣다보면 기분이 이상해지는 묘한 느낌을 받는다는 평이 많았다. 이는 일반적인 사람들에게는 음열음악을 접할 기회가 없기 때문에 처음에는 낯설게 느껴지지만, 더욱 접할 기회가 많아진다면 무조성 특유의 묘한 느낌에 대하여 친숙해 질 수 있는 가능성을 보여준다고 할 수 있다. 이를 위해서 좀 더 친숙하게 여겨질 수 있는 음열음악이 필요하고, 본 논문에서 제시하는 방법은 그 방법 중에 하나로 이용이 될 수 있다고 생각된다.

#### 4. 결론 및 향후 연구계획

본 논문에서는 음열도표를 공간 채움 곡선을 이용하여 탐색하면서 확장된 형태의 음열음악을 생성하는 방법을 제안하였다. 공간 채움 곡선의 특징인 지역성(locality)으로 인하여 결과로 생성된 음악은 적당한 반복성을 지니면서도 음열음악의 무조성적인 느낌을 갖게 된다. 따라서 현대음악에 친숙하지 않은 사람에게도 받아들여질 수 있는 새로운 형태의 음악을 생성할 수 있다.

일반적으로 높은 수준의 음열음악을 작곡하기 위해서는 작곡자의 세심한 음열의 배열 등이 요구된다. 본 논문은 알고리즘을 이용하여 음악을 작곡하기 때문에 이러한 부분이 부족하다는 것이 단점이다. 하지만 알고리즘만으로 생성된 음악도 듣기에 무리가 없는 수준의 음악을 생성할 수 있었고, 후에 작곡가에 의해서 더욱 가공될 수 있는 여지를 제공할 수 있다.

본 연구에서는 대표적인 공간 채움 곡선인 Hilbert 곡선을 이용하여서 음악을 생성하였다. 하지만 다른 종류의 공간 채움 곡선(예를 들어, Peano 곡선, Z-order 곡선 등)(그림 8)을 이용한다면 같은 음열을 가지고도 다른 결과의 음악을

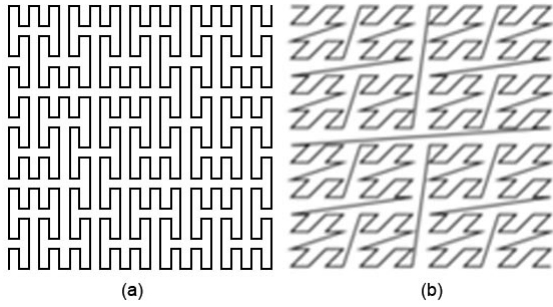


그림 8 다른 종류의 공간 채움 곡선. (a) Peano 곡선, (b) Z-order 곡선.

생성할 수 있다. 이들을 통해 생성된 음악들을 비교하는 것도 향후 연구로 가능하다.

또한 본 연구에서는 단선율적인 멜로디를 구성하는 방법을 제안하였다. 향후 연구 계획으로는 다성적인 음악을 생성하는 방법과, 다양한 악기를 사용하여 더욱 발전적인 형태의 음악을 생성하는 것을 목표로 삼고 있다.

## 참고문헌

- [1] A. Sch berg, *Style and Idea: Selected Writings of Arnold Sch nberg*. University of California Press, 1985.
- [2] D. Cope, *New Music Composition*. Schirmer Books, 1977.
- [3] H. Sagan, *Space-Filling Curves*, Springer-Verlag 1994.
- [4] D. Hilbert, ber die stetige Abbildung einer Linie auf ein Fl chenst ck, *Math. Ann.*, Vol. 38(1891), p. 459-460.
- [5] A. R. Butz, Alternative algorithm for Hilbert's space filling curve, *IEEE Transaction on Computers*, Vol. 20(1971), p.424-442.