

7. Introduction to Timbre

Max Mathews

7.1 Average Spectral Shape

- **Average Spectral Shape**는 음색을 만드는 중요한 요소로 스펙트럼에 나타나는 각 배음의 에너지가 갖는 형태를 의미.
 - 높은 배음으로 가며 나타나는 에너지 감소의 빠르기는 **Spectral rolloff** 혹은 **spectral attenuation**라고 함.

• 다양한 average spectrum의 예

Table 7.1 Fractional amplitudes for 0, 3, 6, 9, and 12 dB per octave attenuation

HARMONIC NO.	(A) 0 dB/OCT.	(B) 3 dB/OCT.	(C) 6 dB/OCT.	(D) 9 dB/OCT.	(E) 12 dB/OCT.
Fundamental ampl.	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Harmonic 2 ampl.	1.0	0.7079	0.5012	0.3548	0.2512
Harmonic 3 ampl.	1.0	0.5784	0.3345	0.1935	0.1120
Harmonic 4 ampl.	1.0	0.5012	0.2512	0.1259	0.0631
Harmonic 5 ampl.	1.0	0.4484	0.2011	0.0902	0.0404
Harmonic 6 ampl.	1.0	0.4095	0.1677	0.0687	0.0281
Harmonic 7 ampl.	1.0	0.3792	0.1438	0.0545	0.0207
Harmonic 8 ampl.	1.0	0.3548	0.1259	0.0447	0.0158
Harmonic 9 ampl.	1.0	0.3346	0.1120	0.0375	0.0125
Harm. 10 ampl.	1.0	0.3175	0.1008	0.0320	0.0102
Harm. 11 ampl.	1.0	0.3028	0.0917	0.0277	0.0084
Harm. 12 ampl.	1.0	0.2899	0.0840	0.0244	0.0071

- 배음의 강도가 옥타브 마다 3, 6, 9, 12dB씩 감소하는 연속 배음(ampl.값은 상대적)의 정보를 표로 나타낸 것.
- 단순화를 위해 monotonic spectra 사용
- Monotonic spectra: 증가하는 로그 함수 주파수에 따라 선적으로 ampl.가 감소하는 스펙트럼.
- Table 7.1의 예
 - (a) 모든 배음이 동일한 ampl.를 가짐(1.0)
 - (c) 기음과 배음의 옥타브 음정관계를 기준으로 매 옥타브 마다 6dB씩 ampl.감소

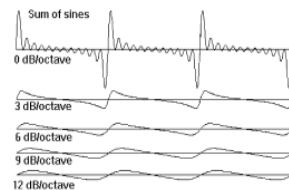


Figure 7.1 Waveshapes for 0, 3, 6, 9, and 12 dB per octave rolloff.

• Spectral rolloff 변화에 따른 주요특징

Type	Wave	Timbre	Similar Example
(a) 0dB	한 주기 내에 작은 파동을 가지는 규칙적 움직임의 연속	매우 거친 음색	오보에 연주 시 연주자의 입(혹은 리드)에서 발생하는 파형과 유사
(b) 3dB	(a)와 (c)의 중간		
(c) 6dB	sawtooth wave	부드러운 음색	현악기의 보잉과 유사. 활을 움직이면 현이 밀렸다 다시 제자리로 돌아오는 행위 반복. 이것이 sawtooth motion을 만들
(d) 9dB	(c)와 (e)의 중간		
(e) 12dB		매우 부드러운 음색	

• 요약

- Average shape의 비교에서 동일한 loudness 유지 중요
- 스펙트럼 rolloff의 negative slope가 커지면 파형은 부드러워짐
- 음색을 고려할 때 average spectrum에 대한 이해 필요
- 음악적으로 가장 흥미로운 rolloff 비율은 3~9dB

7.2 Bumpy Spectra

- **Bumpy Spectra**는 ampl.값의 변화가 복잡한 구조를 갖는 스펙트럼을 의미. 일정 값에 의해 나타나는 monotonic spectra와는 대조적. Monotonic spectra보다 음악적이며, 모든 종류의 bump를 가짐

• Spectrum과 Formant

- Formant(spectral peak)는 스펙트럼에서 중요한 점의 하나
- Formant를 갖는 사운드에서 스펙트럼의 envelope은 세 개의 중심 formant 주파수를 가지며 이러한 formant peak에 의해 특정 모음의 성질 결정

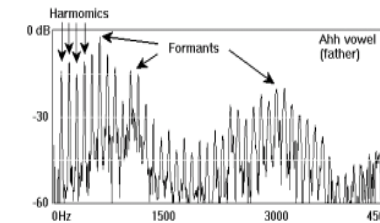


Figure 7.2 Spectrum of vowel sound, showing formants.

- 사람이 입을 움직임으로서 여러 다른 소리를 만들 때 bump가 움직이며 다른 소리 만드는 것이 중요
- 음성에서 formant와 음정은 독립적인 요소
- Formant를 가지는 악기
바이올린: 음성보다 많은 formant가짐. 바이올린의 음색과 직결. 실시간 변화 없음
목관악기: 음성보다 적은 formant가짐. formant가 강하고 인식에 있어 중요

** 목관악기의 formant

목관악기의 경우 고정된 범위에서 하나나 두 개 정도의 공명 주파수가 존재하며 이것이 formant이다. 이 영역은 각 악기의 특징적인 tone을 담당하게 되며, formant 영역 안에 있는 배음들은 (음량이) 증폭된다. 예를 들어 근음이 100Hz인 음을 연주할 경우 8, 9, 10배음이 formant 영역에 들어가게 되며 강조된다. 200Hz가 근음인 음을 연주할 경우는 4, 5배음이 강조된다.

http://emusician.com/tutorials/Resonance_and_Radiation/

** Formant analysis

Formant Regions		
Instrument	Formant 1 (Hz)	Formant 2 (Hz)
Flute	800	n/a
Oboe	1,400	3,000
English Horn	930	2,300
Clarinet	1,500-1,700	3,700-4,300
Bassoon	440-500	1,220-1,280
Trumpet	1,200-1,400	2,500
Trombone	600-800	n/a
Tuba	200-400	n/a
French Horn	400-500	n/a

<http://www-crrma.stanford.edu/~jmcarty/formant.htm>

- 요약
 - 음정 높이에 따라 주파수가 변하는 formant보다 변하지 않는 formant가 더욱 흥미로운 음색
 - Formant freq.가 음정의 주파수에 비례하는 사운드는 음정 변화에도 거의 일정한 파형을 가짐
 - 주파수에 독립적으로 일정한 파형을 가진 사운드는 음정을 변화시킬 경우 둔탁하거나 인공적 음색을 만들

7.3 Holy Spectra

- Ho(e)ly Spectra는 구멍 뚫린 배음을 의미. Nonmonotonic spectra의 일종으로 John Pierce와 Max에 의해 명명.

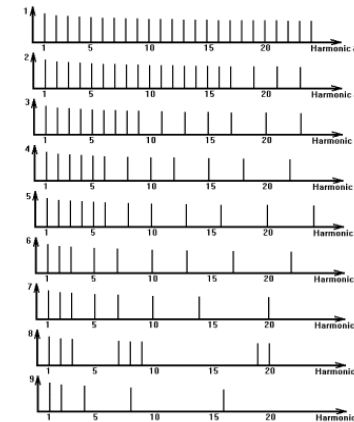


Figure 7.3 Spectra of holy tones 1 through 9.

- 24개의 배음을 기본으로 만들어진 holy spectra의 예
- rolloff는 옥타브당 3dB로 동일하게 적용
- 예) 3: 10, 12, 14, 16, 18, 19, 21, 22, 23 배음 걸여
- 전체적으로 낮은 배음 보다는 높은 배음을 중심으로 배음 삭제(청취의 임계대역폭 (critical bandwidth)과의 관계 때문에)

- 임계대역 주파수 테이블

임계 대역	주파수 (Hz)			11	1480	1720	240
	저음	고음	폭				
0	0	100	100	12	1720	2000	280
1	100	200	100	13	2000	2320	320
2	200	300	100	14	2320	2700	380
3	300	400	100	15	2700	3150	450
4	400	510	110	16	3150	3700	550
5	510	630	120	17	3700	4400	700
6	630	770	140	18	4400	5300	900
7	770	920	150	19	5300	6400	1100
8	920	1080	160	20	6400	7700	1300
9	1080	1270	170	21	7700	9500	1800
10	1270	1480	210	22	9500	12000	2500
11	1480	1720	240	23	12000	15500	3500
				24	15500	22050	6550

<http://blog.naver.com/trysmiler?Redirect=Log&logNo=130006475532>

• 임계대역폭에 따른 사인파의 관계

- 두 사인파가 여러 개의 임계대역폭으로 나뉘어 있는 경우 각각의 소리로 들림
- 두 사인파가 가까운 주파수에서 위치하는 경우 두 개의 사인파로 분리하기 어려움
- 두 사인파가 하나의 임계대역폭에 있는 경우 거친 음색 만듦
- 매우 낮은 pitch를 제외하고 음악적 tone에서 연속된 낮은 배음들은 하나 이상의 임계대역폭에 위치하기 때문에 상호작용하지 않음
- 배음이 높아질수록 임계대역폭에서의 배음 간격이 가까워짐
- 대략 여섯 번째 이후 배음들의 간격은 하나의 임계대역폭에 들어와 거친 소리를 만듦

• Holy Spectra 구성 방법

- 소리에 선명함과 강한 tone power를 주는 고주파성분을 가진 tone을 만들고자함
- 하나의 임계대역폭에 하나 이상의 배음이 있는 경우 하나가 남을 때까지 제거함으로써 holy spectra 만듦
- Holy 7: 높은 배음을 하나 이상의 임계대역폭에 나누어 배열
- Holy 8: holy 7과 동일한 개수의 배음을 사용. 높은 배음을 의도적으로 무시지음
유사한 예 - 바이올린: 현과 공명판의 결합에서 ampl. 값은 주파수와 함께 빠르게 오르내림

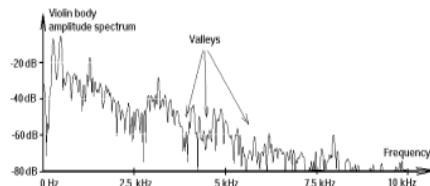


Figure 7.4 Transfer function of violin versus frequency.

Valley 부분은 주파수에서 서로 매우 가까운 고배음이 제거된 것

- Holy 9: 옥타브에 해당하는 배음만으로 만들어짐
- 제거하는 배음에 따라 다양한 음색(different color) 가능
- 제거된 배음의 개수가 아닌 그 위치가 중요

7.4 Time Variation in Sounds

- **Amplitude Envelope**이란 시간에 따른 소리의 amplitude, power, 혹은 loudness의 변화를 의미
- **Envelope 변화에 따른 효과**
 - Amplitude envelope이 빠르게 상행한 후 천천히 하행할 경우 그 소리는 때리는 혹은 뜰는 소리를 만듦

- 높은 배음이 낮은 배음보다 조금 시간차를 두고 올라가면 금속성 소리 만들어짐. 이러한 소리는 합성음에서 filter cutoff를 증가시키거나 FM index를 통해서 만들어짐 (예) 전자 바이올린
- Gong이나 bell소리 배음의 onset을 변화시킴으로서 Jean-Claude Risset에 의한 flude textures만들어짐
- 피아노에서 높은 배음을 약간 올리면 wavering 사운드가 만들어짐

• Vibrato와 Tremolo

- 대부분의 악기 소리는 vibrato와 tremolo를 가짐. Vibrato가 더 중요
- 지속되는 소리에 비브라토가 없는 경우 음악적으로 들리지 않음
- 주기적인 비브라토와 임의적 비브라토의 결합은 지속되는 tone에 음악적 질을 부여

• 시간과 음색 인식의 관계

- 하나의 tone이 가진 timbre를 인식하는데 약 60ms소요
- 4ms이하의 tone은 atonal click으로 인식
- 한 사운드에서 중·고 배음이 약 4dB 변화하는 경우 음색의 변화로 인식되며, 이보다 낮은 배음의 경우 약 10dB정도의 변화 필요

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/sound/timbre.html>

7.5 Concluding Remarks on Timbre

- **음색이란** 동일한 음정과 음량을 가진 두 소리를 구분하는 소리의 질을 의미
 - 소리에서 양(quantity)으로 나타낼 수 있는 모든 특징들에 의해 음색 만들어짐

• 음색인식과 관련된 연구들

John Grey(1976): multidementional scaling을 이용해 악기 간 음색의 유사성 연구
David Wessel(1979): 음색을 활용한 작곡에 관한 연구
Gregory Sandell(1991): 작곡과 음색에 관해 분석적으로 연구

<http://at.or.at/hans/misc/timbre-space/timbre-space.html>

• John Grey의 multidimensional scaling

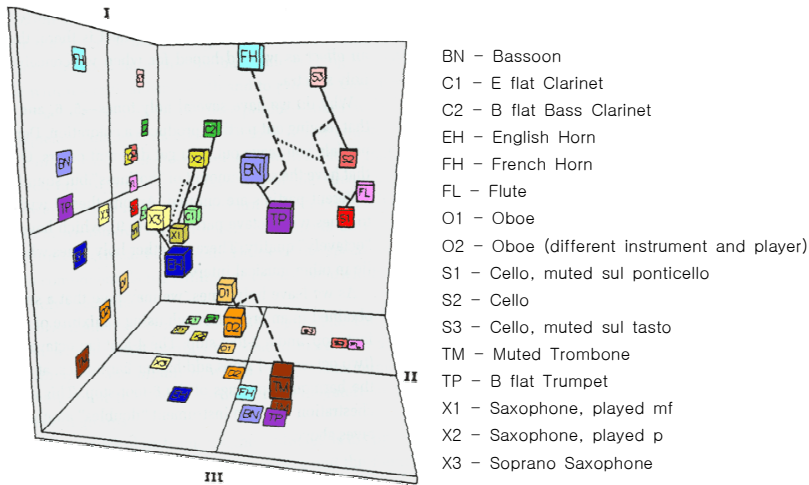
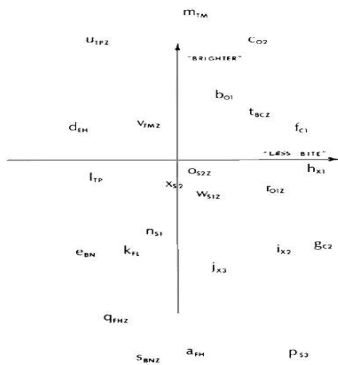


Figure 7.5 Grey의 Timbre Space

- Dimension I: spectral energy distribution, from broad to narrow
- Dimension II: timing of the attack and decay, synchronous to asynchronous
- Dimension III: amount of inharmonic sound in the attack, from high to none

<http://at.or.at/hans/misc/timbre-space/timbre-space.html>

• David Wessel의 two-dimensional representation of the sounds



<http://mediatheque.ircam.fr/articles/textes/Wessel78a/>