

# 1. Pitch perception and Measurement

Roser Shepard

## 13.1 Introduction

- 인지심리학은 우리의 **인식과 물리적 진실의 불일치**의 문제를 다룸
- 심리적 측면에서 Pitch
  - 신호의 주기 혹은 주파수와 연결되지만, 근음만으로 완전히 설명되지 않음
  - 문제제기: 적합한 Pitch인식과 그 측정 방법

## 13.2 Logarithms and the Just Noticeable Difference

- **Gustav Fechner의 JND**
  - 주관적인 경험을 측정하려는 시도
  - 하나의 자극에 대한 인식의 질이 자극이 된 물체의 물리적 구체화 방법에 의해 변화될 수 있다고 생각
  - 이 변화에서 만들어진 인식의 양이 물리적 양의 로그 변형이라고 결론
  - 인간이 감지할 수 있는 최소 물리적 변화로서 JND 측정
  - 변화가 감지되지 않은 부분에서 그 차이 통합
  - 여러 개의 JND사용함으로써 주어진 자극에 대한 심리적 레벨 표현
  - Fechner는 인식적으로 측정된 scale의 근사지점이 로그 함수에 의한 scale임을 발견

### \*\* Weber-Fechner law

- 자극의 물리적 양과 그 자극에 대한 인식의 강도 사이의 관계를 설명한 법칙
- Ernst Heinrich Weber (1795-1878)와 Gustav Theodor Fechner(1801-1887)
- Pitch 인식: 인간은 로그 혹은 기하학적 비율에 의한 방법으로 pitch인식.  
귀에 동일한 거리로 인식되는 음들에서 주파수는 배수 요소와 연관  
음계는 이러한 특징에 따라 만들어짐

[http://en.wikipedia.org/wiki/Weber-Fechner\\_law](http://en.wikipedia.org/wiki/Weber-Fechner_law)

## 13.3 Direct Subjective Assessment

- **S. Smith Stevens의 Direct Subject Assessment**
  - Fechner의 JND에 나타난 문제점  
: 하나의 자극을 정확하게 구별하는 것이 반드시 한 자극의 전체적 인식의 크기와 연관되지 않는다고 주장
  - 해결 방법  
피실험자에게 하나의 tone을 주고 그 tone이 30의 loudness라고 알려줌  
이후 loudness가 다른 tone을 주고 처음에 들려준 tone과 비교해 직접 loudness를 정하게 함 → Direct Subject Assessment

\*\* Stevens' power law

- 물리적 자극과 인식된 강도(혹은 힘) 간의 관계를 나타내는 법칙
- Weber-Fechner law 대체
- 19세기에 나타난 법칙이지만 Stevens가 이 법칙을 다시 사용
- Standard와 modulus 사용
- 피실험자는 연속 자극에 감각과 수치적 판단 간 비율을 유지하기 위해 standard에 따라 인식된 강도를 수치적으로 기록.
- Standard는 피실험자에 의해 결정.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Stevens%27\\_power\\_law](http://en.wikipedia.org/wiki/Stevens%27_power_law)

### 13.4 The Mel Scale

- 정의: 청취자에 의해 판단된 지각적 scale. Stevens, Volkman and Newman
- 측정 방법
  - 1000Hz, 40dB의 tone을 기준이 되는 1000mel로 지정
  - 1000mel을 조절하여 2배 혹은 0.5배 등으로 음정을 조절하도록 요구
  - 이 결과를 토대로 mel scale 지정
  - Figure 13.1은 mel scale에서 각 mel간 거리를 반영하여 피아노 건반에 표현
  - Figure 13.2는 mel scale에 따라 인식하는 음정 크기의 변화를 나타냄

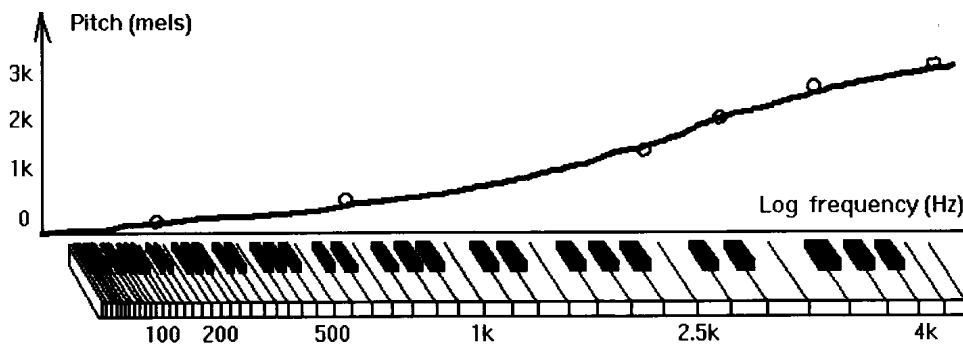


Figure 13.1 Mel scale과 mel scale의 거리에 따라 변형된 건반

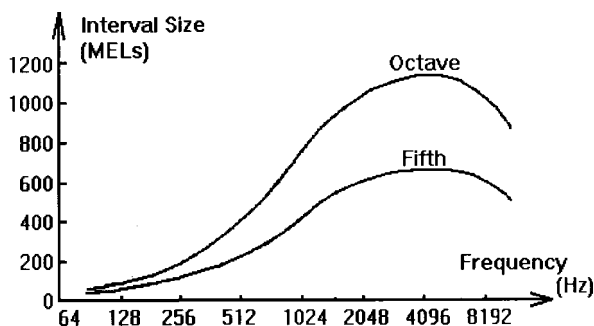


Figure 13.2 Mel scale로 살펴본 음정 크기 변화의 인식

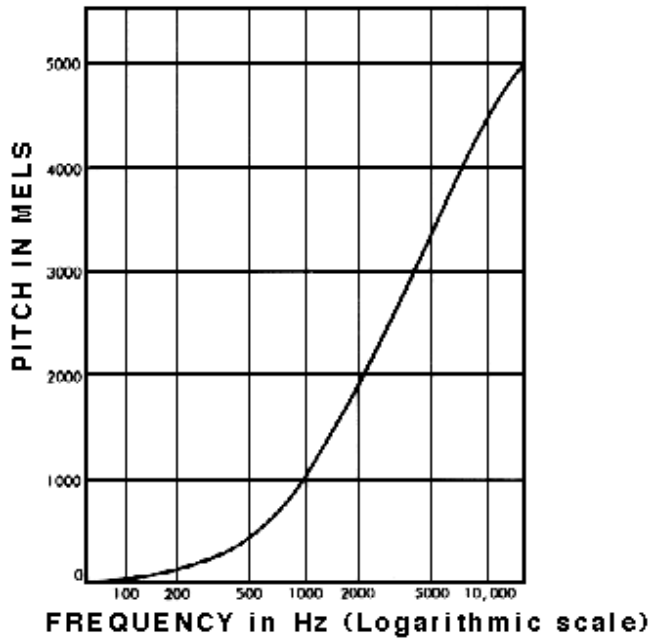


Figure 13.3 Mel scale and Log scale

[http://www.maurograziani.org/text\\_pages/acoustic/acustica/MG\\_Acustica04.html](http://www.maurograziani.org/text_pages/acoustic/acustica/MG_Acustica04.html)

• 결론

- 물리적 주파수와 주관적 주파수 사이의 관계는 비선형적
- 두 음 사이에서 인식된 차이가 건반의 끝으로 갈수록 하행
- 주관적으로 느끼는 옥타브는 1:2가 아닌 위의 음이 조금 높아야 함(혹은 아래 음이 조금 낮아야 함).
- \*\* 이를 stretched octave라 함(실제 희랍시대부터 알려짐)

• 문제점

음악에서의 interval에 나타나는 consonant nature.  
 실제 피아노 건반에서 interval은 음역에 관계없이 consonant 유지.

13.5 Competence vs Performance

- 언어학과 비유에 의한 pitch 특징 설명. Mel scale의 원인 추론
- 언어학에서 competence vs performance
  - Noam Chomsky(1965)에 의한 문법과 구문론 관련 이론
  - 내부적으로 인식한 규칙과 이를 구사하는 실제와의 차이를 의미
  - 사람들이 알고 있는 문법과 실제 언어상의 문법에서 차이 존재
  - 이유: 내부에 규칙은 저장되었으나 제한된 두뇌에 의해 문법적으로 정확한 언어 구사에 문제 발생
  - 문법적 규칙의 무지가 아닌 제한적인 기억력과 진행상의 힘이 규칙의 사용을 방해함

- **Pitch에서 Competence vs performance**
  - 음악적 interval에 대한 규칙을 습득한 음악가조차 음정을 받아들이고, 만들고, 진행시키는데 한계가 있어 극단의 주파수 영역에서 정확한 음정 인식 불가.
  - 이러한 한계를 나타내는 것이 mel scale.
  - 하지만 mel scale(주관적 측정에서 만들어진 동일 거리의 음계) 청취 시 음악적으로 동일한 거리로 들리지 않음.
  - 다른 음역에 있는 음계에 대한 무지에 의한 것이 아닌 mel scale에 의한 pitch인식을 하기 때문
  - 음악적으로 적합하지는 않으나 pitch에 대한 중요한 특징 보여줌

### 13.6 Pitch is Morphophoric Medium

- **Hermann Ebbinghus(1913)의 기억에 관한 연구**
  - 심리학에서 오랫동안 사용되는 전통적인 방법
  - 하나의 연구나 자극에서 남은 정보를 가능한 많이 제거하는 방법
  - 실험
    - 피험자들에게 의미 없는 단어와 음절 리스트를 알려줌
    - 본질적인 의미를 중심으로 복잡성을 제거하도록 요구
    - 각자 의미 있게 생각하는 단어가 다르기 때문에 다양한 결과 만들어짐
- **심리학에서의 적용**
  - 비음악적인 tone(사인파와 비음악적 interval)을 사용하여 복잡성을 제거하도록 요구
  - 귀가 소리를 변환하는 방법과 뇌가 소리를 처리하는 방법 나타남
  - 비음악적 소리보다 음악적 소리가 뇌를 진행할 때 여러 원리 만들어짐
- **Pitch 인식에서의 적용**
  - Fred Attneave 와 R. K. Olson은 위의 내용을 pitch인식과 음악적 tone에 최초 적용
  - 방법: 대부분의 사람들에게 친숙한 선율을 사용
    - 몇 개의 시작 음을 연주한 후 적합한 음이 무엇인지 질문
    - 여기서 선율의 일부를 transpose
  - 실험: NBC chimes 사용(G-196Hz, E-330Hz C-262Hz)
    - 첫 번째 음을 transpose함
    - 청취자에게 나머지 음들을 조절해 원하는 소리를 만들도록 요구

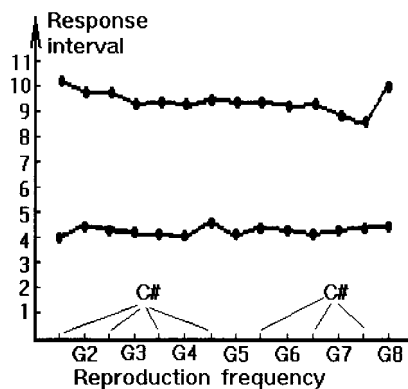


Figure 13.4 NBC chime의 변형에 대한 반응

- **결과**
  - 조절한 사운드는 mel scale이 아닌 일반적인 음악 주파수 범위의 로그 주파수 scale
  - 로그 scale에 선적이지만 높은 주파수에서는 조금 변형.
- **Morphophoric Medium**
  - Morphophoric Medium은 형식을 만들 수 있는 medium을 의미
  - Attneave 와 Olson
  - 소리를 이루는 특성 중 pitch와 시간이 morphophoric medium
- **Morphophoric Medium 실험**
  - 시각: 시각에서 morphophoric medium은 공간
    - 예) 직각 삼각형이 어떤 공간에 존재할 경우 그 삼각형은 공간을 이동하더라도 동일한 삼각형으로 인식
      - 공간이라는 medium은 변형되어도 본질을 유지하는 하나의 형태를 만들
  - 청각: 청각에서 morphophoric medium은 pitch
    - 예) 단순한 선율 같은 pitch pattern이나 화성은 pitch를 달리하여(위아래로) 이동하여도 여전히 같은 pattern으로 인식 가능
      - Pitch라는 medium은 변형되어도 본질을 유지하는 하나의 형태를 만들

### 13.7 Dispensable versus Indispensable Attributes

- Morphophoric medium과 non-morphophoric medium의 관계와 유사한 개념
- 인지 심리학자인 Michael Kubovy에 의해 적용
- 시각과 청각 모두 특정 감각 영역에서 분명히 나타나지 않는다는 점에서 유사하기 때문에 두 감각의 비교를 통해 dispensable vs indispensable attributes 살펴봄

• 시각에서 dispensable vs indispensable attributes

- 두 개의 projector를 이용한 실험

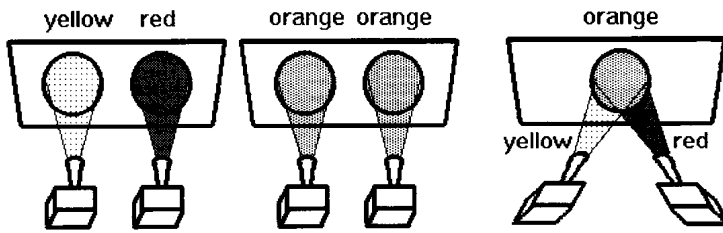


Figure 13.5 색과 공간위치에 따르는 인식의 변화

- ① 각각 다른 위치에 노란 점과 빨간 점을 투사  
→ 각각의 object는 색과 공간 위치라는 두 개의 특성을 나타냄
  - ② 각각 다른 위치에 주황색 점을 투사(1의 색깔만 주황색으로 변경)  
→ 공간 위치라는 하나의 특성을 나타냄(색의 특성 없음)
  - ③ 원래색인 노란 색과 빨간색으로 변화시킨 후 두 점을 가운데로 이동시켜 일치  
→ 원래 존재하지 않았던 새로운 색 만들어짐(본래 가진 색의 구별 불가).
- 결론: 시각에서 공간은 필수적 특징

• 청각에서 dispensable vs indispensable attributes

- 두 개의 스피커 이용한 실험

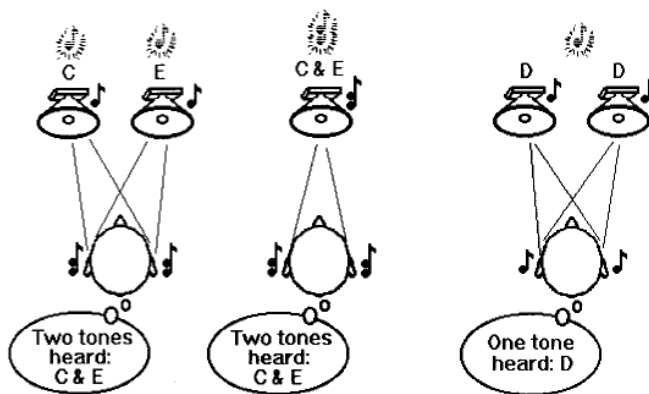


Figure 13.6 pitch와 공간위치에 따르는 인식의 변화

- ① 두 개의 스피커에서 각각 C와 E(C의 3도 위)를 전달  
→ 한 음은 왼쪽, 다른 한음은 오른쪽 스피커에서 나온다고 반응
- ② 하나의 스피커에서 두 음을 동시에 전달  
→ 두 개의 음으로 인지
- ③ 양쪽 스피커에서 동일한 D를 전달  
→ 두 스피커의 가운데에서 들리는 하나의 재료로 인식.

- 결론: 청각에서 pitch는 필수적 특징

색	○	×	○	Pitch	○	○	×
공간	○	○	×	공간	○	×	○
개별 인식요소	색, 공간	공간	없음	개별 인식요소	pitch, 공간	pitch	없음

Table 13.1 시각과 청각에 나타나는 필수적 특징 비교

- 통합적 결론

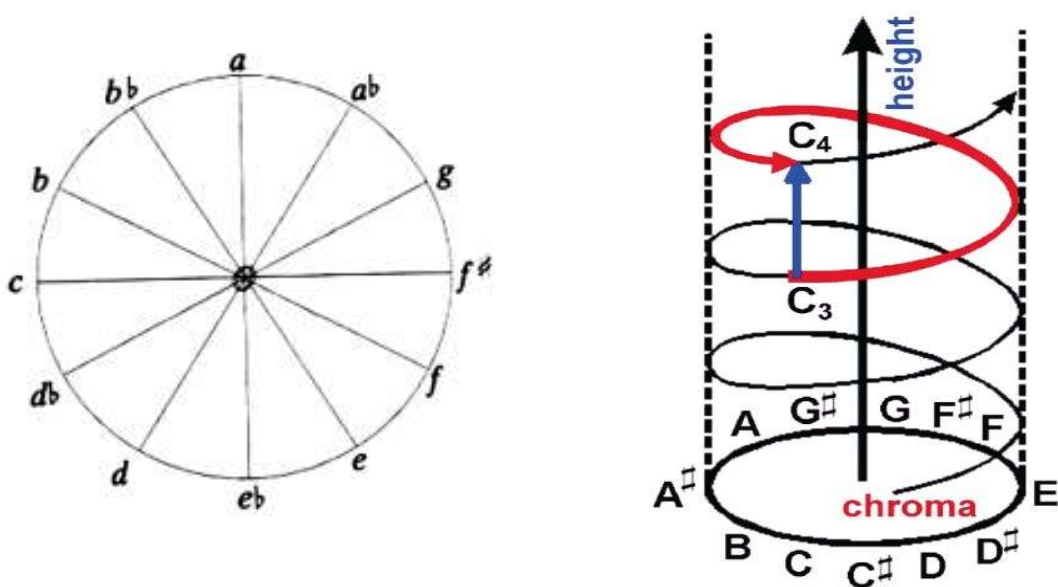
주파수와 관련된 현상이라는 점에서 청각의 pitch와 시각의 색을 연관시키지만 위의 실험 결과 이 두 요소는 유사하지 않음

청각에서의 pitch는 morphophric medium이라는 측면에서 시각에서의 공간과 유사

### 13.8 Spaces to Represent Pitch: Chroma versus Height

- Attneave와 Olson의 견해

- Pitch는 morphophric medium이기 때문에 새로운 연구 방법 요구된다고 주장
- Pitch pattern의 변화에 따른 청취자의 반응을 예로 들며 로그 주파수에 대한 반응 설명
- 하지만 로그 주파수에 의한 scale의 경우 특정 음정관계 표시 불가
- 특정 음정관계가 의미하는 것은 옥타브와 완전5도
- 이 두 음정의 경우 모든 문화의 음악 체계와 음계에서 나타나는 보편적인 특징



Figutr 13.7 (a) Moritz Drobisch의 helix Figure 13.7 (b) Octave 관계를 나타내는 pitch helix

<http://ccat.sas.upenn.edu/music/music55/sept16.html>

<http://www.pdn.cam.ac.uk/groups/cnbh/research/publications/WUPG03/WUPG03.htm>

- Pitch의 나선형 배열
  - 로그 주파수에 의한 scale에서 표현하지 못하는 옥타브 관계를 표현하기 위해 피치를 나선형으로 배열
  - Height: 나선형에 나타나는 수직 위치
  - Chroma: 옥타브 안에서 각 pitch의 위치
  - Pitch 조직에 관한 이러한 개념의 영향으로 Shaperd tone 고안
  - 일반적인 12음 단계 대신 10개의 동일한 단계로 옥타브 분할
  
- Shaperd tone을 이용한 실험
  - 피험자 분류: 피험자의 음치 여부에 따라 세 개의 그룹으로 나눔
    - Group1 - 음악적으로 뛰어남
    - Group2 - 두 그룹의 중간
    - Group3 뛰어나지 못함. 사인파에 의한 test에 통과하지 못한 그룹
  - 피험자들에게 Shaperd tone으로 만들어진 가능한 모든 tone의 쌍을 들려줌
  - 더 높은 tone을 판단하도록 요구

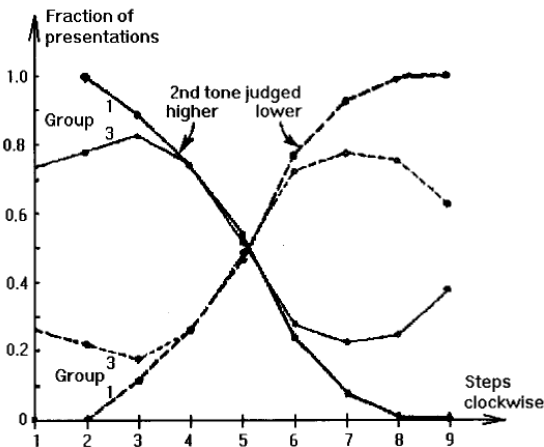


Figure 13.8 Shaperd tone에 대한 그룹 1,3의 반응 곡선

- 결론: 시계 방향으로 회전할 경우 chroma circle의 마지막 tone이 상행한다고 반응 증4도 음정을 중심으로 각 그룹의 반응이 이분됨  
음정 간격이 좁은 부분을 제외하면 두 그룹의 반응 유사
- 선율에 나타나는 음정 진행 방향은 전후 흐름에 따라 다르게 인식

### 13.9 Separating Height from Chroma

- 옥타브 관계에서 생성되는 공통점을 표현하기 위해 height와 chroma의 분리 시도

- Height만을 유지하는 방법
  - ① Noise를 band-pass filter에 통과시키는 방법  
Band-pass filter의 중심 주파수에 의해 height 결정. 이때 chroma는 존재하지 않음
  - ② 옥타브의 12음을 동시에 연주하는 방법



- Chroma만을 유지하는 방법
    - Shepard tone을 이용하는 방법
  - Pitch가 아닌 요소에 사용된 Shepard tone의 개념
    - Ligetti의 tempo illusion
      - Tempo에서 다른 비율을 가진 두 pulse를 이용해 각 pulse의 음량 값을 반비례시킴.
    - Risset의 tempo illusion과 time illusion(rhythm, illusion)
- \*\* Continuous Risset scale (혹은 Shepard-Risset glissando): shepard tone에 의한 scale의 각 pitch가 연속적으로 이동하도록 만든 scale.

### 13.10 Confusing Chroma and Height

- Jay Dpeling and A. W. Hollombe(1977)에 의한 방법
  - Chroma가 pitch의 근간이 된다면 chroma를 유지하고 height를 변화시킬 때 선율은 어떻게 인식될 것인가에 관한 문제 제기
  - 청취자가 height는 인식하지 않고 chroma만에 집중할 수 있도록 하기위해 뒤섞인 height를 사용.



Figure 13.9 동일한 선율에 height를 변화시킨 예 (a) 임의의 height 사용  
 (b) 선율의 윤곽을 유지하면서 변화하는 height 사용 (c) 일반적인 표기

- 결과
  - (a) 음악적 지식이 있는 사람들도 인식하기 힘든 표기. 선율 인식 매우 힘들
  - (b) 선율 인식에 있어 (a)보다 쉬움. 인식 가능
- 부정확한 chroma 정확한 shape와 height 윤곽을 가진 경우 (a)보다 인식 쉬움
- 선율에 대한 인식은 chroma만큼 height에도 영향

• 환상면체를 통한 5도 음정관계 표현

- 실제 음악에서 완전5도 역시 중요한 음정으로 인식되지만 Figure 13.7(b)의 나선 구조는 완전5도의 관계를 표현하지 못하는 문제 제기
- 4차원의 환상면체(toroid)를 통해 5도 관계 표현 가능해 짐

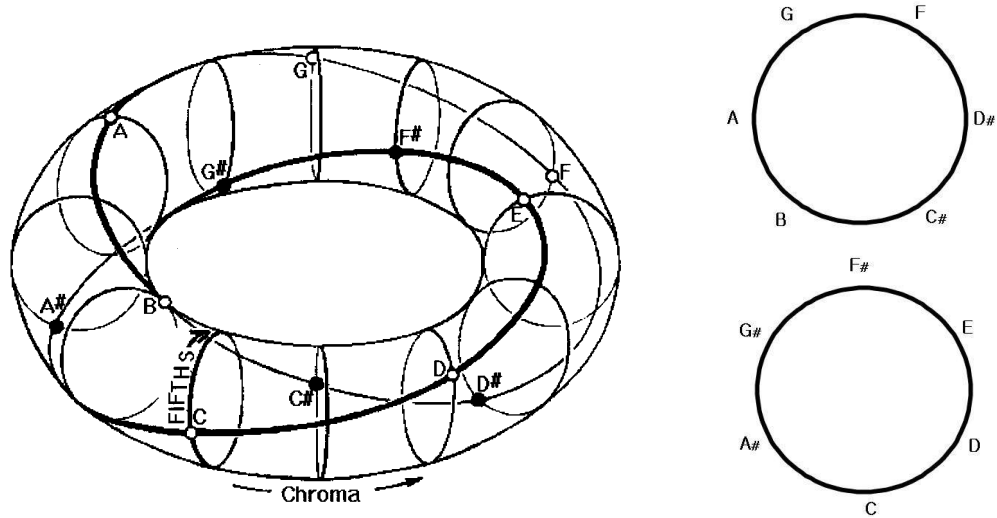


Figure 13.10 옥타브와 완전5도의 관계를 표현하는 4차원의 환상면체

- 원통을 잘랐을 때 만들어지는 scale은 wholetone scale

• 이중나선 구조를 통한 음정관계 표현

- Figure 13.10에 나타나지 않은 height, chroma의 관계를 나타내기 위해 5차원 공간 창조

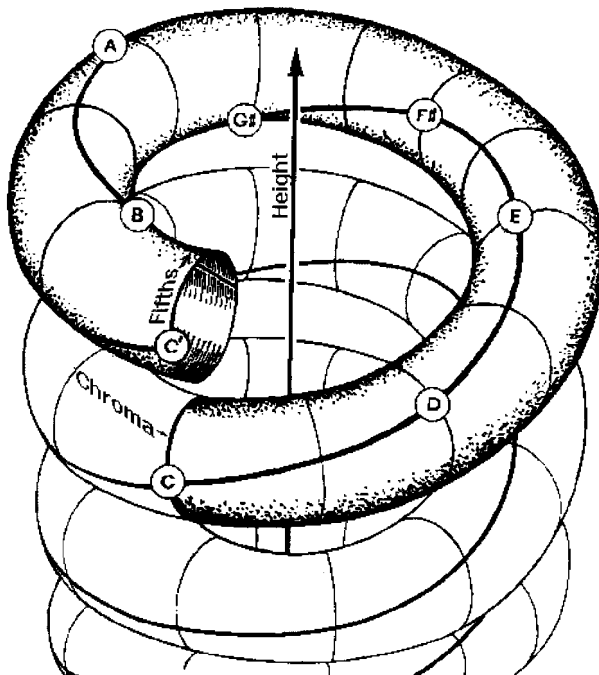


Figure 13.11 옥타브와 완전5도, height, chroma의 관계를 표현하는 5차원 이중 나선구조

- 실험: Figure 13.11에 대한 반응  
음악적 경험과 지식에 따라 세 개의 그룹으로 나눔
- 결과: 모든 피험자가 chroma에 반응했으나 height에 대한 반응 저조  
음악적으로 우수한 그룹의 경우 5도권에 가장 많이 반응

• Melodic space

- Figure 13.11의 환상면체를 잘라 직사각형에 표기한 것

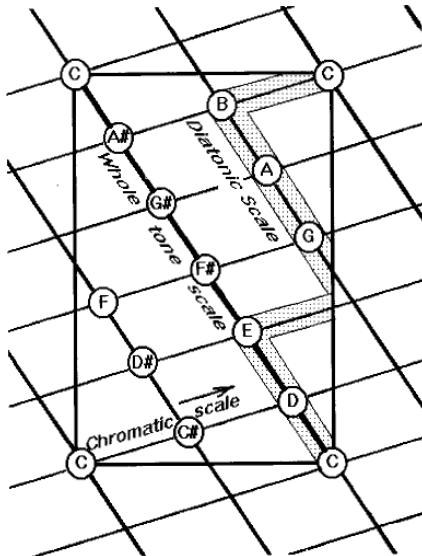


Figure 13.12 Melodic space

- 선율이 대체로 작은 단계(음정)로 이루어진다는 데서 명명
- 영어 민요 3000곡의 분석 결과 선율상의 음정 진행의 68%가 단2도 이내이며, 91%가 장3도 이내

• Melodic space와 연관된 개념들

- Korte의 third law  
: 애니메이션의 개념적 원리에 관한 법칙  
연속 자극 간에 공간 혹은 시간이 거리를 증가시킬 경우, 명확한 움직임의 연속 길이를 유지하기 위해 그들 사이의 다른 거리 증가시킴.  
즉 큰 단계는 지속적인 진행하기 위해 더 많은 시간 요구.

<http://journalofvision.org/7/8/9/>

- David Huron의 음정에 관한 연구: Korte의 third law와 유사
- Fitt's law:

인간공학분야에서 인간 움직임의 model. 목표지점의 거리와 그 크기의 기능으로서 목표지점으로 즉각 이동하는데 소요되는 시간을 예상하는 것  
변형을 만드는데 소요된 시간은 거리에 비례하고 크기에 반례

[http://en.wikipedia.org/wiki/Fitts'\\_law](http://en.wikipedia.org/wiki/Fitts'_law)