

Inharmonicity가 피아노의 음색에 미치는 영향에 관한 연구

최인용, 윤성용, 김세웅, 성광모

서울대학교 전기컴퓨터공학부 음향공학연구소

Influence of inharmonicity on the tone of a piano

In Yong Choi, SungYong Yoon, Se Woong Kim, Koeng-Mo Sung

Applied Acoustics Laboratory, Seoul Nat'l University

ciy@acoustics.snu.ac.kr

요약

Inharmonicity가 피아노의 음색에 미치는 영향을 가능한 한 객관적으로 평가하기 위해 본 연구에서는 inharmonicity는 다르면서 음색에 영향을 미치는 다른 모든 요소들은 같게 합성된 여러 샘플들을 이용해 청취평가를 시행하는 방법을 사용한다. 합성된 피아노 음의 부분음들이 가지는 시간 영역 엔벨로프는 실제 녹음된 피아노 음에서 추출되었으며 인위적으로 조절되는 inharmonicity의 크기 역시 실제 녹음된 피아노 음에서 얻은 데이터에 근거하였다. 청취평가는 피아노의 음색을 표현한다고 생각되는 적절한 형용사들의 쌍으로 만들어진 질문들로 이루어졌으며 평가를 반복해가며 보다 객관성을 높이기 위한 방법들을 시도하였다. 이러한 과정에서 얻은 결과들을 통해 그 동안 막연히 이해되어오던 inharmonicity와 음색의 관계를 보다 세밀하고 객관적으로 분석할 수 있다.

1. 서론 및 개요

피아노의 현은 높은 강성(stiffness)을 가지는 고탄소강으로 되어 있으며 이 때문에 각 부분음의 주파수가 기본주파수의 정수 배보다 다소 크다. 이를 inharmonicity라 하며 이는 피아노의 음색에 있어서 매우 특징적인 현상으로 생각된다.

n 번째 부분음의 inharmonicity 크기 I_n 은 다음 식과 같이 표현된다.

$$I_n = f_n - nf_1 = n(n^2 - 1)A \quad (1)$$

여기서 f_1 은 해당 음의 기본 주파수이며 f_n 은 n 번째 부분음의 주파수이다. A 는 inharmonicity

상수라고 부르며 현의 재질 및 장력 등에 의해 결정된다.

이 inharmonicity는 피아노 음색의 매우 중요한 특징 중 하나로 알려져 있으나 그 크기와 음색 간의 정량적이고 객관적인 관계가 만족할 만한 정도로 밝혀져 있지는 않다. 이는 두 가지 문제에서 기인한다. 첫째는 음색이라는 것이 매우 주관적인 개념이어서 과학적인 방식으로 논의되기 어렵다는 것이다. 둘째로는 음색을 결정하는 다른 요소들은 모두 같으면서 inharmonicity만이 다른 두 가지의 음을 비교해서 들어보기가 어려운 것이 있다.

이 중 첫 번째 문제를 해결하기 위해서 우리는 피아노의 음색을 잘 설명한다고 생각되는 형용사의 쌍을 여러 가지 마련하여 믿음만한 청취자들에게 대해 청취평가를 시행하였다. 형용사 쌍은 애매 모호하거나 오해의 여지가 없는 것들로 준비하였다.

두 번째로 음색의 다른 요소들은 같고 inharmonicity만이 다른 피아노 음들을 만들어내기 위해 우리는 몇 가지 단계를 거쳤다. 일단 우리는 그랜드 피아노의 몇 음을 현을 바꾸어가며 녹음했다. 앞서 설명하였듯이 inharmonicity의 크기는 음 높이가 같을 경우 현의 재질 및 현에 걸린 장력 등에 의해 결정되며, 이 때문에 현이 바뀌면 inharmonicity의 크기도 달라지게 된다. 이와 같은 과정을 거친 이유는 해당 음에 대해 일반적인 inharmonicity의 크기를 얻음과 동시에 각 부분음들의 엔벨로프를 추출할 모델을 확보하기 위해서이다.

우리는 세 가지 종류의 일련의 다른 현들을 사용하였는데, 이 중 한가지는 측정 대상이 되었던

그랜드 피아노의 크기(161cm)에 표준으로 쓰이는 현들이며 다른 한가지는 이보다 더 큰 inharmonicity 상수를 가지도록 만들어진 현, 나머지 한가지는 표준보다 작은 inharmonicity 상수를 가지도록 만들어진 현들이다. 이 과정에서 우리는 녹음 및 측정, 부분음들의 시간영역 엔벨로프 곡선 추출의 대상이 될 음을 권선이 쓰이는 저음역으로 제한했으며 이에 따라 11번 음부터 28번 음까지가 측정 및 모델링 대상이 되었다. 그 이유는 권선이 쓰이는 이 음역대에서 inharmonicity 상수의 크기 조절이 비교적 폭넓게 가능해 샘플의 확보 및 연구 결과의 응용이 용이하기 때문이다.

여러 크기의 inharmonicity를 가지는 피아노 음을 만들어 내는 일의 다음 단계는 위의 단계에서 얻은 부분음들의 주파수 및 엔벨로프를 이용한 피아노 음의 합성이다. 이를 위해서 일단 관측된 기본 주파수 및 부분음들의 주파수를 가지는 정현파들이 만들어졌다. 여기에 각 음의 부분음들로부터 추출된 시간영역 엔벨로프 곡선들이 곱해졌고, 이렇게 만들어진 기본음 및 부분음들은 더해져서 최종적으로 하나의 피아노 음이 합성되었다.

이 과정은 비교적 작은 크기의 inharmonicity를 가지는 음들, 중간 크기의 inharmonicity를 가지는 음들, 큰 inharmonicity를 가지는 음들 등 세 가지 피아노 음들의 집합에 대해 같은 방식으로 행해졌다. 다른 집합에 속한 같은 높이의 음들은 기본 주파수와 각 부분음들의 시간영역 엔벨로프 곡선은 동일하나, 부분음들의 주파수에서 차이가 있다. 이와 같은 과정 전체를 통해 우리는 음색에 영향을 미치는 다른 요소들은 같으면서 inharmonicity만이 다른 세 종류의 피아노 음들의 집합을 얻을 수가 있었다.

이렇게 합성된 피아노 음은 청취 평가에 사용되었다. 우리는 음향학을 전공하거나 악기 및 음악 이론을 전공하는 25명의 학생들을 대상으로 청취 평가를 시행하였다. 합성된 피아노 음들은 단독으로, 화음으로, 펼친 화음으로, 그리고 간단한 멜로디로 구성되어 들려지도록 하였다. 피아노 음들이 들려질 때 제시되는 질문들은 피아노의 음색을 묘사하는 형용사의 쌍들로 구성되었다. 이 형용사 쌍은 명료하다/둔탁하다, 밝다/어둡다, 날카롭다/몽롱하다, 차다/따뜻하다, h 축하다/베말랐다, 긴장되어있다/이완되어있다 이다. 모든 질문에서 두 종류의 다른 피아노 음이 짝지어져 들려졌으며 청취자들은 이 피아노 음을 듣고 단지 주어진 질문에서 언급된 대응되는 형용사의 쌍에 각각 알맞은 피아노 음을 선택하면 되었다. 이 결

과들이 종합적으로 조합되어 각 질문들에 대해 inharmonicity의 크기가 다른 세 종류의 피아노 음들이 가지는 순위가 결정되었다.

2. 녹음 및 분석을 통한 피아노 음 정보의 추출

우리는 측정 및 합성을 할 음으로 11번, 13번, 15번, 16번, 20번 음을 선택하였는데 이는 차례대로 G1, A1, B1, C2, E2 음에 해당한다. 거의 모든 피아노들은 저음역의 30개 정도의 음에 대해 강선에 구리선 혹은 동선을 감은 권선인 현을 사용한다. 강선의 특성이나 구리선 및 동선의 특성을 조절함으로써, 또는 단위 길이 당 구리선의 감은 회수 및 감을 때의 겹쳐짐을 조절함으로써 피아노 현의 inharmonicity 상수를 조절할 수 있다. 따라서 이들 저음역의 권선을 사용하는 음들은 inharmonicity의 크기를 조절할 수 있는 여지가 비교적 많으며 이는 역으로 inharmonicity의 크기와 음색의 상관 관계에 대한 연구의 결과가 이들 권선을 사용하는 낮은 음들에 대해서는 보다 폭넓게 적용될 수 있다는 것을 의미한다.

측정에는 국내의 피아노 회사가 제조한 161cm 크기의 그랜드 피아노가 사용되었다. 측정의 대상이 되는 피아노 음은 0.1cent의 해상도를 가지는 미세한 조율기를 이용해 조율되었으며 조율에 대한 확인은 녹음 직전에 정교하게 이루어짐으로써 다른 종류의 현을 장착한 경우에 대해서 기본주파수의 크기가 다른 일이 없도록 하였다. 피아노 및 녹음 장비들은 조용한 스튜디오 안에 설치되었다. 추를 자유 낙하시키는 방식의 타건기를 제작해 타건하였으며 48kHz의 샘플링 주파수와 16bit의 비트율로 디지털 녹음하였다.

녹음한 피아노 음을 주파수 분석하였다. 부분음의 주파수를 찾고 inharmonicity의 크기를 측정하기 위해 96000개의 샘플에 대하여 Fourier transform을 수행하였으며 이를 통해 0.5Hz의 주파수 해상도를 확보할 수 있었다.

그림 1은 11번 음에 대해서 세 종류의 다른 현에 대한 inharmonicity의 크기 측정 결과를 도시한 것이다. x축은 부분음 번호를, y축은 Hz 단위로 표시한 inharmonicity의 크기를 나타낸다. 세 종류의 현에 대해 inharmonicity의 크기가 다소 차이를 보이는 것을 볼 수 있다.

또한 녹음 후 각 부분음의 시간 영역 엔벨로프 곡선을 추출하기 위해 short-time Fourier transform이 수행되었다. 그림 2는 역시 11번 음을 short-time Fourier transform한 결과를 3차원으로 도시한 것이다. 약 30초간 지속되는 음을 20Hz부터 4500Hz의 주

파수 범위에서 그래프로 나타내었다.

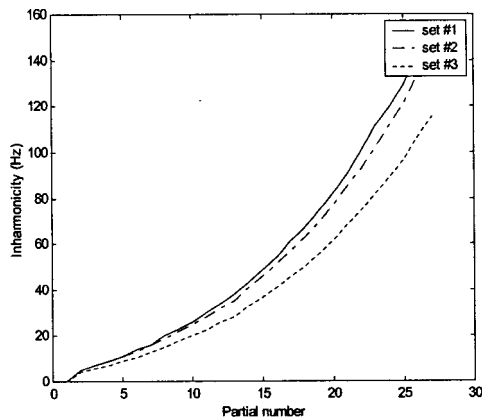


그림 1. 세 종류 현에 대한 11번 음의 inharmonicity 크기

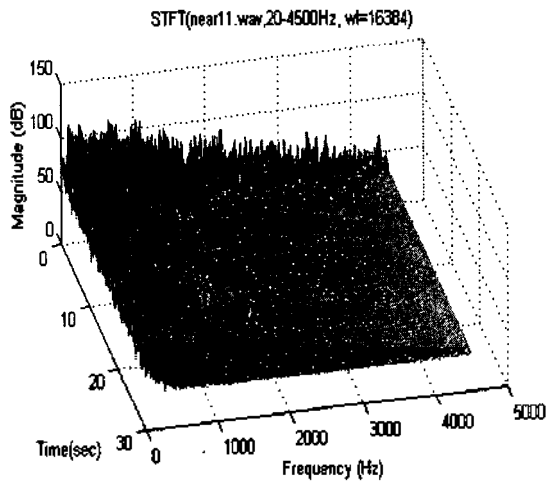


그림 2. 11번 음의 short-time Fourier transform

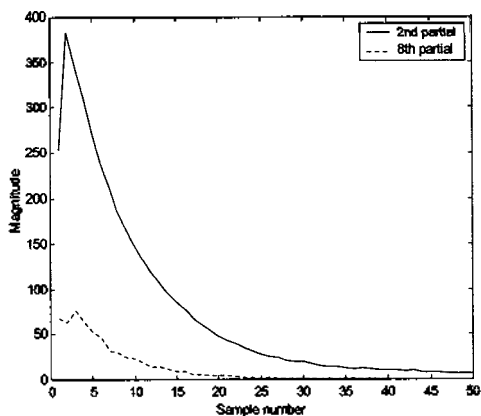


그림 3. 11번 음의 2번째 부분음 및 8번째 부분음의 시간영역 엔벌로프 곡선

그림 3은 그림 2의 그래프로부터 추출한 11번 음의 2번째 부분음 및 8번째 부분음의 시간 영역 엔벌로프 곡선이다. 해머의 타현 자점이 현의 유효 진동 길이 중 1/8 지점에 가까워 8번째 부분음의 크기는 상대적으로 매우 작은 것을 볼 수 있다.

3. 추출된 정보를 이용한 피아노 음의 합성

기본적으로 본 합성의 목적은 음색의 다른 요소는 모두 같고 inharmonicity만이 다른 피아노 음을 합성하는 것이며, 이를 위해 세 종류의 녹음된 피아노 음과 같은 부분음 구성을 가지는 세 종류의 피아노 음 샘플을 만들었다. 물론 모든 세 종류의 피아노 음에서 같은 높이의 음에 대해서는 각 부분음의 시간 영역 엔벌로프 곡선 및 부분음의 개수가 같게 합성되어야 한다.

합성의 첫 번째 단계는 정현파를 만들어내는 것이다. 하나의 피아노 음에 대해서 기본음 및 각 부분음 하나 당 한 개의 정현파가 사용되었다. 정현파의 주파수는 녹음한 피아노 음의 분석에서 얻은 각 부분음의 주파수를 사용하였다.

해당 부분음의 정현파에 대해 역시 녹음한 피아노 음에서 추출된 그 부분음의 엔벌로프 곡선을 곱했다. 이 방식으로 얻은 부분음들과 기본음을 더해 하나의 피아노 음이 만들어졌으며 같은 방식으로 한 종류에 5개씩 총 15개의 피아노 음이 합성되었다.

4. 청취 평가

합성된 음을 이용해 25명을 대상으로 청취 평가가 시행되었다. 음향학을 전공하거나 각종 악기 및 음악 이론을 전공하는 학생이 청취 평가 대상이 되었다.

합성된 피아노 음은 총 세 가지의 비교 대상 중 두 가지가 짝지어져 일단 한 음씩 들려진 후 화음으로, 필친 화음으로, 단순한 멜로디 만들어져 번갈아가며 들려졌다. 한 쌍의 피아노 음을 들은 후 청취자들은 다음의 형용사 쌍에 맞도록 두 가지 피아노 음을 구분하도록 하였다 - 명료하다/둔탁하다, 밝다/어둡다, 날카롭다/몽롱하다, 차다/따뜻하다, 축축하다/메말랐다, 긴장되어있다/이완되어있다.

모두 세 종류의 피아노 음을 비교해야 하지만 보다 명확한 비교를 하기 위해 세 가지 피아노 음을 한 번에 비교해야하는 일은 없도록 하였다. 청취자들은 단지 두 가지의 피아노 음을 듣고 '둘 중 이것이 저것 보다 명료하다' 하는 식의 판단만을 하면 되었다. 이 비교의 결과들은 조합되어 세 가지의 피아노 음의 해당 형용사 쌍에 대한 순위를 결정하였다.

이 청취 평가의 결과에 따라, inharmonicity의 크기와 피아노 음색 평가와의 관계를 도출했다.

청취 평가 결과, 청취자들은 inharmonicity가 클수록 상대적으로 명료하며, 밝고, 날카롭고, 차고, 긴장되어있는 것으로 평가했다. 대체로 거의 모든 청취자들이 이와 같은 평가를 내려 평가는 믿을 만한 것으로 생각되었다. 그러나 축축하다/메말랐다는 평가 항목에 대해서는 일관된 반응을 보이지 않아 이에 대한 결론은 제외했다.

추가 의견으로 청취자들은 inharmonicity의 크기가 큰 음일수록 다소 음 높이가 높게 느껴진다고 평가했다. 평가에 사용한 저음역의 음들은 기본음의 에너지가 매우 작으므로 부분음들의 주파수가 상승하는 것을 직접적으로 음높이의 상승으로 느낀다는 것은 타당한 것으로 생각되었으며, 위 질문들에 대한 평가 결과 역시 음 높이가 상승한 것으로 들리는 것이 끼친 영향이 큰 것으로 생각되었다.

5. 결론 및 요약

각각 같은 시간영역 엔벌로프 곡선을 가지는 같은 개수의 부분음과 같은 기본음을 가지면서 각 부분음의 주파수는 달라 inharmonicity가 다르도록 만들어진 3종류의 피아노 음이 inharmonicity의 크기와 음색의 상관 관계를 분석하기 위한 청취 평가에 사용되었다. 청취 평가 결과 특히 저음역의 경우 inharmonicity가 클수록 음 높이가 상향조정된 것으로 느껴지며 동시에 상대적으로 명료하며, 밝고, 날카롭고, 차고, 긴장되어있는 것으로 평가되었다. 차후에 중음역 및 고음역에 대해서도 이와 같은 방식의 평가가 필요할 것이며 현재 시행 단계에 있다.

참고문헌

1. T. D. Rossing, 'The Science of Sound', Addison Wesley, 1989.
2. P.P. Vaidyanathan, 'Multirate Systems and Filter Banks', Prentice Hall, 1992
3. K. A. Legge, N. H. Fletcher, 'Nonlinear generation of missing modes on a vibrating string', J. Acoust. Soc. Am. 76 (1), July 1984.
4. Jean Lattard, 'Influence of inharmonicity on the tuning of a piano - Measurements and mathematical simulation', J. Acoust. Soc. Am. 94 (1), July 1993.