

# 충돌음 합성에 의한 가상환경의 청각적 인터랙션 디자인

## Auditory Interaction Design By Impact Sound Synthesis for Virtual Environment

남양희

이화여자대학교 디지털미디어학부

Yang-Hee Nam(yanghee@ewha.ac.kr)

### 요약

본 논문에서는 객체 간 충돌음과 같이 가상환경의 발생 상황을 전달할 수 있는 중요한 감각 채널 중 하나인 소리를 통해 청각적 인터랙션을 디자인할 수 있는 방법을 제시하였다. 철, 고무, 유리 등 물질별 기본음 샘플에 대해 각각의 고유음을 특징짓는 모드 게인 값의 스케일 변경을 허용함으로써 디자인적 변형이 가능하도록 하고, 충돌 상황에 대한 인지적 속성인 충돌체의 크기, 딱딱한 정도, 접촉면적, 충돌 속도 차이에 의한 충돌음의 변화를 실시간에 재현할 수 있게 하는 계산적 알고리즘을 사용한 방법이다. 소리를 통한 충돌물체의 물질 및 충돌 상황 인지 실험을 통해 제안된 방법이 가상환경 청각적 인터랙션 디자인에 사용될 수 있음을 보였다.

■ 중심어 : | 가상환경 | 충돌음 | 청각적 인터랙션 | 소리합성 |

### Abstract

Focused on the fact that sound is one of the important sensory cues delivering situations such as impact, this paper proposes an auditory interaction design approach for virtual environment. Based on a few sampling of basic material sound for various materials such as steel, rubber, and glass, the proposed method enables design transformations of the basic sound by allowing modification of mode gains that characterize natural sound for the material. In real-time virtual environment, it also provides simulation of modified sound according to the change of impact situation's perceptual properties such as colliding objects' size, hardness, contacting area, and speed. The test results on cognition experiment for discriminating objects' materials and impact situation by sound showed the feasibility of proposed auditory interaction design method.

■ keyword : | Virtual Environment | Impact Sound | Auditory Interaction | Sound Design |

## I. 서론

가상현실이나 증강현실의 응용들은 사용자와의 상호 작용에 따른 상황 전개가 특징이어서, 상호작용에 부합하는 즉각적 피드백과 사실감 있는 감각정보 재현이 사

용자 경험에 매우 중요한 요소로 여겨진다. 특히, 소리 정보 제공은 사용자의 인지적 경험과 몰입적 환경 구축에 있어서 시각표현 다음으로 중요하며[1], 아주 정교한 그래픽만을 사용하는 경우에 비해 연관된 청각적 피드백이 동시에 존재하는 경우 더 큰 몰입감을 줄 수 있다.

\* 본 연구는 2012년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

(NRF-2012S1A5B6034337)

접수번호 : #130426-008

접수일자 : 2013년 04월 26일

심사완료일 : 2013년 05월 03일

교신저자 : 남양희, e-mail : yanghee@ewha.ac.kr

그러나, 가상환경과 같이 상호작용 상황에 따라 실시간으로 산출되어야 하는 가상음의 디자인은 애니메이션 등 기존의 사운드 콘텐츠 디자인과는 다른 양상을 띠 수밖에 없으므로, 본 논문에서는 상호작용적인 면을 강조하여 전통적 사운드 디자인과 구분하고자 ‘청각적 인터랙션 디자인’이라 칭하였다.

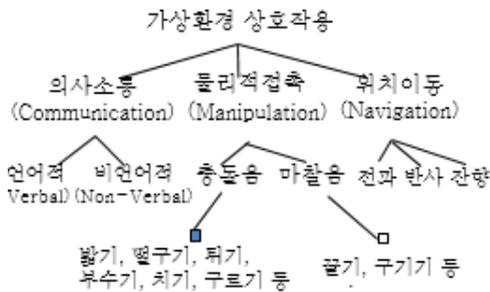


그림 1. 가상환경 상호작용 중심의 소리 분류

현재까지 가상환경 상호작용시 발생하는 실감 음향의 표현 연구는 실세계음의 녹음과 단순 재생 (playback)에 의존해온 경향이 있다. 가상환경에서 발생 가능한 모든 상황에 대해 거의 유사한 실제 환경을 만들어두고 모든 소리를 녹음할 수 있다면, 녹음과 재생이 가장 정확한 사운드 렌더링 수단이 되겠으나 그러한 예측과 녹음은 현실적으로 가능하지 않다.

이에 본 논문의 연구목적은 가상환경의 객체 상호작용을 묘사하는 음향 효과 디자인에 있어서, 사전 녹음의 의존도를 줄이면서 적은 수의 기본음을 바탕으로 상호작용 내용에 따른 실시간 소리 변형을 허용하는 청각적 인터랙션 디자인 방법을 탐색하고 가상환경의 실시간 소리 합성 가능성을 확장하는 것이다.

가상세계에서 소리의 발생과 관련된 상호작용은 [그림 1]에 보인 바와 같이 언어적/비언어적 의사소통과 물리적 접촉 및 위치이동(navigation)으로 크게 구분된다. 이 가운데 의사전달을 위한 자발적 행위인 의사소통의 경우를 제외하면, 위치 이동 및 물리적 접촉이 가상환경에서 음향 변화를 일으키는 주요 상호작용이다. 이 가운데 특히 충돌음은 사용자와 객체 혹은 객체간의

부딪힘, 구르기, 튀기, 떨어지기 등 물리적 접촉을 수반하는 상호작용에서 종종 발생하여 실세계에서의 사람-객체, 객체-객체간 역동적이고 흥미로운 상호작용과 미리 정해지지 않은 발생 상황들을 표현할 수 있으므로, 가상환경에서 상호작용에 의해 발생하는 가장 빈번하고 중요한 가상음이라 할 수 있다.

이에 본 논문은 ‘충돌’로 인한 소리 표현을 연구 대상으로 하였으며, 특히, 충돌음의 성격이 매우 다른 액체, 기체는 배제하고 강체류의 충돌을 우선 고려하여, 적은 수의 기본 샘플을 바탕으로 실시간의 충돌 상황에 맞는 소리 합성 방안 및 실험결과를 제시한다.

## II. 가상환경 청각적 인터랙션 디자인 현황

사용자와의 실시간 상호작용에 따라 내용이 변화하는 가상환경의 청각적 인터랙션은 사용자가 발로 찬 가상의 공이 가상 쓰레기통과 부딪칠지 벽이나 땅과 충돌할지, 앞에 선 캐릭터의 옷자락에 부딪칠지 미리 알 수 없으므로 실시간 계산이 필요하다.

이러한 가상 충돌음의 실시간 재구성을 통한 청각적 인터랙션 디자인 연구는 크게 샘플링 방식[3]과 물리 기반 시뮬레이션 방식[4]으로 구분할 수 있다.

먼저, 샘플링 방식[3]은 실제 세계에서 가장 유사한 상황에 대한 소리를 녹음하므로 상황이 일치할 경우 가장 정확한 재현이 가능하나, 가상환경의 실시간 상호작용은 미리 예측하기 어렵고 다변적이다. 충돌이라는 상호작용에 관계되는 모든 객체 조합이나 객체 구성물질 및 크기, 충돌 빠르기 및 충돌 면적 등, 각종 상황을 고려한 소리 샘플들을 미리 마련하기란 현실적으로 어렵고, 예술적이거나 과장적 표현을 위한 디자인적 접근 가능성은 처음부터 배제된다. 또한, 저장 공간이 많아지므로 이로부터 실시간에 상황에 해당하는 소리를 찾아 낼 수 있도록 하기 위한 소리 데이터베이스의 관리 및 메타데이터 부여 방법 등도 문제가 된다.

이에 반해,, 충돌의 물리적 현상 그대로를 수학적으로 시뮬레이션 하는 물리 기반 계산법에 의한 소리 재현 연구들이 있다[4][5]. 이 방법들은 주로 환경 및 건축의

소음과 진동 영향 분석을 위해 진동의 빈도(주파수), 폭(진폭), 진동시간, 모양(파형)과 같은 물리적 변수를 통해 모델링한다. 특히, 충돌음은 충돌체들의 물리적 속성 및 충돌상황에 따라 발생하는 진동이 합성되어 발현되는 소리입에 착안하여, Van den Doel 등이 공진계(Modal Resonator)에서의 진동 진폭 변화를 통한 충돌음의 물리적 계산법을 처음으로 제시하였으며, 이 방법으로 물체의 강성, 탄성, 질량 등을 표현할 수 있음을 밝혔다. 그가 제시한 모드 해석법(modal analysis)은 현재까지도 음향 분석 및 재현에 주로 사용되는 기법이다. 이후 속도를 개선하기 위한 후속 연구들도 있었으나 진동 면적이 넓을수록 계산량이 크게 증가하여 여전히 실시간 응용에는 부적합하다. 또한, 물리적 사실감을 위한 정교한 시뮬레이션에 초점을 두었으므로 실제 사용자가 인지하지 못하는 부분까지 과도하게 세밀한 모델링을 하는 비효율성이 있다.

이상과 같은 두 방식의 장점 및 한계점을 정리하면 [표 1]과 같다. 즉, 샘플링 방식은 실시간성이 높고 제작에 의한 디자인이 가능하지만 충돌 상황을 반영하는 실시간 변형이 어려우며 상황적 정확도를 추구할수록 사전제작 또는 사전샘플링의 양이 방대해져서 노동집약적이다. 물리 기반 접근법은 사전샘플링 없이 충돌 상황별 변화 재현이 가능하지만 실시간성이 낮고 디자인적 개입 여지가 거의 없다.

한편, 이러한 두 방식 각각의 단점을 보완하는 연구들이 최근에 시도되고 있다. Corbett 등[2]의 연구에서는 터치와 같은 사용자-객체 상호작용에 대해 충돌체의 상호작용 부위에 따른 음색 변화의 모달 데이터를 자동화된 특수 측정 플랫폼을 통해 샘플링할 수 있게 함으로써 기존 샘플링 방식의 사전샘플링에 필요한 노동 강도를 낮출 수 있게 하였는데, 특수 샘플링 기계가 필요하다는 것은 여전히 문제가 된다. 한편 물리 기반 계산법을 개선하기 위한 Visell 등[5]의 연구는 충돌 이벤트 중 특히 주기적인 상호작용 구조를 갖는 걷기(walking)에 대해 음향 속성보다는 상호작용의 속성, 즉, 발걸음 주기와 걷기 자세, 발에 가해지는 힘 등에 주목하여 속도를 개선하게 하였으나, 충돌 상황을 발걸음 소리에만 한정하는 문제가 있었다.

표 1. 선행연구 비교분석

	샘플링 기반 디자인	물리 속성 기반 시뮬레이션
사전샘플링 요구도	높음(노동집약적)	필요없거나 낮음
실시간성	높음	낮음
충돌상황 적응성	낮음	높음
디자인 개입여지	높음	보통/낮음

한편, Microsoft 연구소의 Lloyd 등[6]은 이상적인 충돌음 솔루션은 충분한 제어 가능성과 디자이너 사용 용이성이 있어야 한다고 주장하고 하나의 샘플로부터 물리적 모달 모델(modal model)을 계산한 후 디자인적 제어를 허용하는 방식을 제안하였다. 샘플링과 물리 기반 충돌음 표현법을 간략화하여 사용한 방법이라고 할 수 있는데, 이 연구는 충돌체의 속성이나 충돌 상황과 무관하게 샘플 스펙트로그램을 디자인적으로 변형하는 것에만 의의를 두었다.

이상과 같은 기존 연구들의 흐름에서 흥미로운 것은, 최근 연구로 울수록 정확한 물리적 계산이나 모든 상황에 대한 사전 샘플링을 통한 정확도의 추구보다는, 샘플링은 줄이되 인지적인 충돌 속성이나 충돌의 상황적 속성 중심으로 간략화된 물리적, 디자인적 변형을 고려하는 경향이 높아지는 것을 알 수 있다.

따라서, 본 연구 역시 그러한 맥락에서 소리의 정밀도보다는 충돌 상황의 전달이라는 실시간 청각적 인터랙션의 ‘인지적 속성’에 초점을 맞춘다. 본 논문의 선행 연구인 이정선의 논문[7]에서도 인지적 충돌 상황 표현 방법을 연구하였으나, 주성분 분석을 사용한 기본음 표현이라는 핵심적 내용에 오류가 있었음을 실험을 통해 파악하였고, 디자이너의 개성적 변형을 허용하지 않는 계산적 접근법이라는 한계가 있었다.

이에 본 논문은 기본음의 표현 방식으로 충돌음 샘플의 스펙트로그램을 그대로 사용하고, 물질별 대표 샘플만을 사용하여 샘플링 요구도를 최소화함으로써 사운드 데이터베이스를 간소화한다. 또한, 적은 수의 샘플에 대해 사운드 디자이너나 가상환경 개발자가 기준 샘플 음원의 고유 성격을 유지하면서 변형할 수 있도록 디자인 용이성을 제공하며, 충돌 상황의 인지적 속성에 적응적인 사운드 합성법을 제시한다.

### III. 가상 충돌음 실시간 합성 모델

본 논문에서 제안하는 가상 충돌음의 실시간 합성 모델은 [그림 2]와 같이 사전 샘플링하는 단계와 충돌상황의 인지 속성에 기반한 상황 적응적 실시간 사운드 변형 단계로 이루어진다.

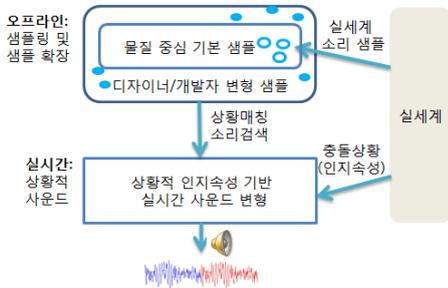


그림 2. 가상 충돌음 합성 모델 개요

#### 1. 물질 중심 사전 샘플링과 기본음 표현

충돌체의 속성은 물질(material)과 형태(shape), 크기(size), 딱딱한 정도(hardness)를 포함하며, 충돌음에 영향을 주는 충돌 상황은 충돌 부위의 접촉 면적, 충돌 속도가 있다. 기존의 샘플링 기반 접근법에서는 가상환경의 모든 충돌음 변형요인들의 조합을 고려하여 가능한 샘플들을 모두 실세계 녹음을 통해 수집하는데, 각종 상황 변수들이 지닐 수 있는 값들의 모든 조합에 대해 샘플링해야 하므로, 이들을 모두 실제 환경에 연출하고 사전에 녹음하기란 불가능한 경우가 많다.

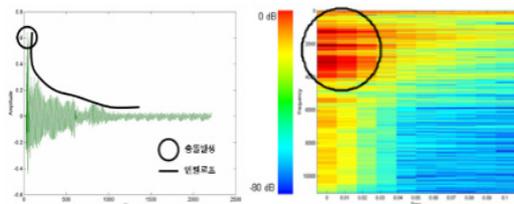
따라서, 본 논문에서는 충돌 속성 중 음향 이론적 합성이 불가능하여 사전 샘플링이 불가피하며 근본적으로 가장 뚜렷한 충돌음 차이를 발생시키는 ‘물질’별 충돌음만을 사전 샘플링하여 기본음으로 하고, 물질 외 충돌 속성에 의한 변형음의 생성 방법을 제시함으로써, 기본음에 대한 제어와 변경을 가능케 한다.

먼저, 기본음의 표현은 추후 변형음 생성 알고리즘 적용에 중요한 문제가 된다. 물리적 소리는 진폭(Amplitude), 음색(Timbre), 감쇠시간(Decay Time), 엔벨로프(Envelope) 등 여러 특징을 지닌 진동하는 신호로 표현되는데, [그림 3](a)와 같이 시간당 진폭 변화를 나타내는 파형분석을 통해서 진폭, 엔벨로프, 감쇠시

간 등을 알 수 있지만, 소리의 가장 큰 특징인 음색을 결정짓는 주파수 성분을 알 수 없고[7], 파형 대신 스펙트럼을 사용할 수 있으나, 이는 한 순간의 주파수 성분만을 드러낸다.

따라서, 본 논문에서는 [그림 3](b)와 같이 시간의 변화에 따른 주파수 성분 변화를 통해 파형과 스펙트럼을 동시에 알 수 있는 스펙트로그램(Spectrogram)으로 충돌음을 표현한다. 가로 축이 나타내는 시간 흐름에 따라 세로 축의 주파수들의 발생 강도(intensity; 단위 dB)를 색으로 표현한 스펙트로그램이다. 붉은 색에 가까울수록 강도가 높고, 파란 색에 가까울수록 주파수 발생 강도가 낮으며, 가로축을 따라 증가하는 시간별로 세로축을 따라 나열된 주파수 성분들의 강도의 변화 및 감쇠를 파악할 수 있다.

충돌체의 물질 조합별로 샘플링된 충돌음에 대해, 이와 같이 시간에 따른 주파수 성분 변화를 알 수 있는 스펙트로그램과 함께, 충돌체의 구성 물질 유형 및 크기(부피), 내부 공간(구멍 또는 패임)의 유무, 충돌면의 단면적 등을 저장한다. 샘플음에 대해 이러한 정보를 기준 정보로 저장함으로써 실제 충돌 상황과 샘플링 상황의 비교를 통해 2절에서 설명하는 기본음의 변형이 가능하게 된다.



(a) 파형분석 예 (b) 스펙트로그램 예  
그림 3. 파형 및 스펙트로그램 표현 비교

#### 2. 인지적 충돌 변수에 의한 실시간 소리 합성

충돌은 두 물체의 고유진동수가 만나 생성하는 진동의 빈도(주파수), 진폭, 진동시간, 모양(파형) 등 물리적 변수들에 관계하지만, 사람의 청각적 지각은 이들 물리적 변수 대신 음의 높이(음고), 크기(음량), 길이(음가), 색채(음색)로 차이를 인지한다. 특히, 심리음향학 분야에서는 청각은 시각보다 민감도가 떨어지기 때문에 정

확한 변화나 소리 특징의 절대값을 인지하기보다는 비교 사운드에 의해 상대적으로 인식한다는 것이 알려져 있다[8].

또한, 유럽의 사운드 오브젝트 프로젝트[8]는 사람이 소리로써 인지 가능한 충돌 물체의 속성들이 무엇인지를 연구하여 실험을 통해 물질(material), 형태(shape), 크기(size), 딱딱함(hardness)이 소리를 통해 상대적으로 인지됨을 제시하였다. 즉, 예컨대 물체의 절대적 크기는 알 수 없으나 비교 대상이 되는 두 가지 소리를 들려주면 상대적 인 크기 차이를 인지할 수 있다는 것이다.

따라서 본 논문에서는 인지 가능한 충돌 변수 중 충돌체의 특성으로 물질, 크기, 형태, 딱딱함을 고려한 이점선의 방법[7]을 사용하였으며, 충돌의 상황적 변수로 접촉 면적(impact area) 및 충돌 속도(impact speed)를 추가하였다. 이들 인지적 변수 값은 실시간 충돌 상호작용 시 가상환경의 객체 시뮬레이션 정보를 통해 얻어지는데, 이들 실시간 변수값을 저장되어 있는 유사 샘플의 기준 값과 비교하여 그 상대적 차이를 충돌음에 반영할 수 있도록 하는 것이다. 각 충돌 속성의 상대적 차이를 소리에 반영하는 실시간 제어 방법을 아래에 설명한다.

먼저, ‘크기’의 인지에 큰 영향을 끼치는 것은 충돌음의 중심주파수 변화인데, 사람은 소리를 통해 절대적 크기가 아닌 상대적 크기를 인지한다. 실제로 진동모드 해석 방법[9]에 의하면 식(1)과 같이 고유 진동수(natural frequency)가 왼쪽 식(물체의 속이 비어있지 않은 경우)과 같이 질량  $m$ 에 반비례하거나, 오른쪽 식(속이 비어있어 물체 내부에서 울림을 가지는 경우)과 같이 단면적  $S$ , 물체의 길이  $L$ , 스프링 역할을 하는 공기의 부피  $V$ 에 관계된다.

본 논문에서는 주어진 충돌 상황과 가장 유사한 기준 샘플의 주파수  $f_0$ 를 식(2) 또는 식(3)과 같이 중심주파수 이동에 의해 변화시키는 방식을 채택하여[7] 주파수가 질량, 길이와 부피에는 반비례, 단면적에는 비례하도록 한다.  $f_c$ 는 이동된 중심주파수이며,  $h$ 는 실험을 통해 얻는 보정 계수이다.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{LV}} \quad (1)$$

$$f_c = f_o \times \sqrt{\frac{m_o}{m_c}} \times h \quad (2)$$

$$f_c = f_o \times \sqrt{\frac{S_c L_o V_o}{S_o L_c V_c}} \times h \quad (3)$$

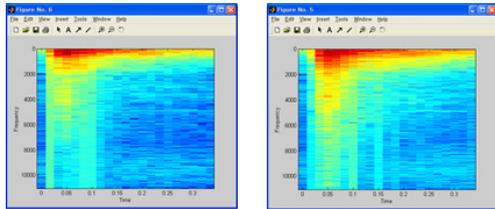
두 번째로, 형태의 인지는 위의 크기 변수에 복잡하게 연관되어 있어서 중심주파수의 변화 역시 형태 차이를 표현하게 된다. 그러나 그 상관관계는 정확히 밝혀져 있지 않고, 충돌하는 물체의 접촉 면적이 좁은 경우가 넓은 경우에 비해 상대적으로 음색이 날카롭고 음고가 낮음이 알려져 있다. [그림 4](a)는 나무 책상과 사기 컵이 좁은 면으로 충돌했을 때의 스펙트로그램이고 [그림 4](b)는 나무 책상과 사기컵이 넓은 면으로 충돌했을 때의 스펙트로그램을 나타낸다. 충돌 면적이 넓은 경우, 중심주파수 주변의 주변 주파수들이 늘어나고 중심주파수의 크기(db)는 낮아진 것을 확인할 수 있었다.

이와 같은 접촉면적에 따른 음색 및 음고의 변화는 스펙트로그램을 이미지로 간주하였을 때 블러링(blurring) 및 샤프닝(sharpening) 효과에 해당함에 착안하여, 접촉면의 상대적 크기 표현을 위해 사운드 스펙트로그램에 영상처리에서 일반적으로 사용되는 가우시안 필터 및 고주파 통과 샤프닝 마스크를 적용하였다. 이를 통해, 중심주파수가 다소 약화되면서 주변으로 퍼지는(blurring) 효과, 혹은 그 반대의 효과를 재현할 수 있다. 마스크 내부의 값의 비율은 충돌 면적의 크기에 비례하여 좀 더 많이 블러링되거나 적게 블러링되도록 변형할 수 있으며, 마스크의 크기는 스펙트로그램 구성 시 시간 축의 FFT 윈도우 이동 범위의 크기에 따라 달라질 수 있다. 실험 결과 실제의 접촉면적 차이보다 다소 과장된 차이를 표현하는 것이 상대적 접촉면적에 대한 청취자의 인지를 돕는 경향이 있다.

세 번째로, 충돌체의 딱딱함은 충돌음의 감쇠 시간(decay time)에 관계하는데, 감쇠시간은 최고 진폭의 크기 값(db)이  $1/e$  ( $e=2.718$ ) 감쇠되기까지 걸리는 시간(초)을 말하며, 짧을수록 충돌체가 딱딱하게 인지된다. 1절의 [그림 3]에서 보였듯이 감쇠시간은 물질별 샘플의 파형 분석으로부터 얻을 수 있고, 스펙트로그램 상에서 주파수 중 무게 중심이라 할 수 있는 스펙트럼 중

심(spectral centroid)이 가장 큰 강도를 보이는 시간을 기준으로 기준 샘플의 감쇠시간에 대한 보간 및 외삽을 통해 감쇠시간 변형을 주파수 스펙트럼에 반영한다.

끝으로, 충돌체의 속도는 가상환경의 충돌 반응 시뮬레이션시 계산되는데, 속도가 높을수록 인지되는 충돌음의 크기(볼륨)이 커지므로, 볼륨을 상대적으로 제어하여 충돌 속도를 반영한다.



(a) 좁은 면 충돌 (b) 넓은 면 충돌  
**그림 4. 접촉면적에 따른 충돌음 변화**

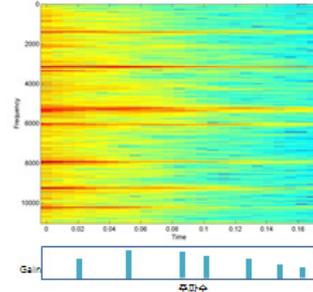
### 3. 사운드 디자인을 통한 샘플 확장

앞 절에서 설명한 바와 같이 기준 샘플의 인지 속성 대비 실시간 충돌 속성 차이를 반영한 소리 변형 합성 기법은 가상환경의 다양한 실시간 충돌음 재현을 가능하게 하고, 기본적으로는 충돌체들의 물질 조합 유형별 하나씩의 기준 샘플만으로도 이러한 방법의 적용이 가능하다. 그러나, 디자인적인 변형이나 과장, 연출이 필요한 경우, 또는 실세계에 존재하지 않는 가상적 물체의 충돌음을 디자인하는 경우 등 사운드 디자인의 여지는 근본적으로 차단하게 된다.

따라서, 본 절에서는 1절에서 제시한 바와 같은 샘플링된 기본음들에 대해 고유 성질을 유지하면서 개발자 또는 디자이너의 필요에 따른 사운드 변형을 허용하기 위해, Lloyd가 제안한 모드 게인(Mode Gains; dB단위) 값 변경 방식을 적용하였다[6].

즉, 모달 분석(modal analysis)에 의해 구해지는 진동 모드들은 [그림 5]의 스펙트로그램에서 붉은 색이 길게 나타난 부분들에 해당하며, 일정 시간 이상 주파수 강도가 임계치 이상으로 유지된 주파수들이 모드를 구성하게 된다. 가상환경 개발자나 사운드 디자이너는 이러한 모드 게인 값을 각각 늘이거나 줄이면서 변형하여 기본음의 변형 샘플들을 생성함으로써 샘플 DB를 확장

할 수 있다.



**그림 5. 사기(porcelain) 충돌음과 모드 게인**

이와 같은 방식으로 개발자나 디자이너가 샘플을 추가하게 되면 가상환경에 필요한 모든 샘플들을 사전에 전부 마련하지 않더라도 필요에 따라 점진적으로 사운드 디자인 또는 추가 샘플링을 통해 샘플 수를 확대할 수 있고, 동일한 물질이라도 누앙스를 달리하여 서로 다른 고유 충돌음으로 묘사되게 할 수 있다. 특히, 사운드의 변형 의도에 따라 실제 세계에 존재하지 않는 물체의 사운드 표현을 의도하는 경우, 모드 게인값의 랜덤 변형을 적용한 디자인 실험이 가능하다.

이와 같이 개발자나 사운드 디자이너의 디자인을 허용하면서도 물질 고유의 모드 게인값을 중심으로 변형함으로써 물질별 충돌음의 성격과 확연히 다른 엉뚱한 샘플이 해당 물질의 충돌음으로 추가되는 경우를 방지할 수 있으며, 반대로 실세계의 기존 충돌음과는 매우 다른 가상적 충돌음의 디자인을 의도적으로 시도할 수도 있다.

## IV. 구현 및 실험 결과

제안된 실시간 충돌음 합성방법에 의한 가상환경의 청각적 인터랙션 실험을 위해, [그림 6]과 같이 총 10종의 물질별 물체들을 삽입하여 실험환경을 구축하고, 물질별 기본 충돌음원을 샘플링한 후, 디자인적 변형을 통해 음원 보충 후 충돌음 인지 실험을 수행하였다.

실험 대상자는 비교적 청음 훈련이 되어 있다고 생각되는 음악 관련 전공자들 5명(그림 6)과, 그렇지 않은

대학생 5명(그룹 h')으로 구성하였으며, 이들을 대상으로 두 가지 실험을 행하였다.



그림 6. 실험용 가상환경 구성

첫 번째 실험 A는 먼저, 피실험자들에게 실험용 가상 환경을 보여준 후, 각 객체들을 자유롭게 마우스로 클릭하거나 이동시켜 발생하는 충돌음을 듣게 하였다. 음 발생시, 해당 음이 발생하는 객체에 대한 물질 정보가 화면에 표시되도록 하였다. 이 때, 서로 충돌하는 물체의 크기나 충돌면적, 딱딱한 정도 등을 눈여겨보도록 했으며, 이동 속도를 달리하여 충돌 속도를 변경하고 소리를 관찰하도록 했다. 그런 후, 소리 경험을 충분히 한 피실험자에게 가상환경 그래픽을 보지 않도록 하고 [표 2]와 같은 목록만 제시한 후, 실험자가 뒤에서 마우스를 조작하여 충돌을 발생시켰다. 각 사람마다 실험자가 총 50 건의 랜덤 물체 선택을 통해 실험하였으며, 이때 피실험자로 하여금 [표 2]의 목록 중 어떤 객체 간 충돌이 발생했는지를 추정하여 표기하도록 하였다.

두 번째 실험 B에서는 사전 청음 절차를 생략하고 특정 객체 두 개의 충돌음을 먼저 들려주면서 어떤 물질로 이루어진 객체 간 충돌인지 알려주었다. 그런 후, 동일한 물질로 이루어진 다른 객체 조합의 충돌음을 들려주고 상대적 크기 또는 속도, 충돌면적 변화를 짐작하여 표기하도록 하는 일종의 객관식 테스트를 하였다.

[그림 7]은 실험 결과를 보여준다. 실험 A는 총 50건의 랜덤 물체 선택을 통한 실험 결과 중 5가지 사례에 대한 결과만을 발췌한 것이다. 유리-유리간 충돌, 고무-고무간 충돌 등 동종 물질로 이루어진 객체 간 충돌에 대해서는 소리 인지 결과가 우수했고, 그렇지 않은 경

우는 그룹 h, 그룹 h' 모두 물질 간 혼동이 높아서 전반적으로는 인식률이 낮았다. 특히, 철과 알루미늄, 돌과 시멘트, 플라스틱 종류의 물질은 혼동률이 높았는데, 이는 다양하고 복잡한 물질 구성의 실험환경에서 매우 예민한 구분 능력이 요구된 데 기인한 것으로 볼 수 있다.

표 2. 청각적 인터랙션 실험 대상물질 및 물체

재질(물질)	해당물체
시멘트	벽, 벽돌블럭
철	키넥트 토이, 싱크대, 냄kin받침, 의자다리
나무	주방 다이, 식탁, 의자, 화분
유리	유리창, 유리컵
벽돌(돌)	벽체, 벽돌블럭2
고무	고무공, 타이어
알루미늄	유리창 샷시, 냄비
사기	화병, 그릇
종이	메모지, 박스
플라스틱	쓰레기통, 전화기

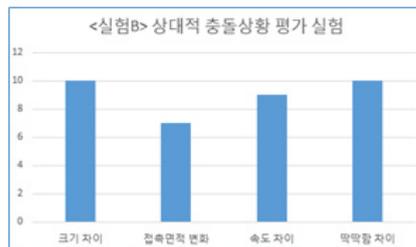
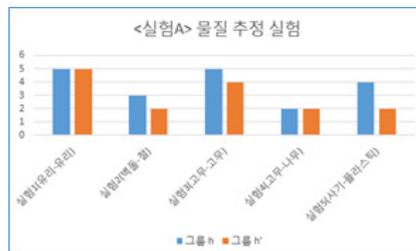


그림 7. 물질 추정 및 충돌상황 인지 평가

그럼에도 불구하고, 동일 물질로 된 물체간 충돌음들의 경우 실제로 대상이 된 물체 조합이 달라져도 추정 결과가 상당히 정확함을 통해, 물질의 기본음 표현으로부터의 디자인적 변형이나 상황별 소리 변형 적용 결과가 물질의 고유음 성격을 유지할 수 있었음을 확인할 수 있었다.

실험 B의 경우는 충돌상황을 상대적으로 변화시킨 8가지 경우에 대해 상황인지를 실험한 것인데, 접촉 면적의 경우 정확도가 좀 떨어지지만 전반적으로 올바르게 인지된 상황 평가가 90%로서, 그래픽을 보지 않고 소리만으로 상당히 정확한 상황 추정이 가능함으로 보였다.

이와 같이, 물질별로 샘플링된 고유음의 특성을 유지하면서 변형이 가능하여 변형 후에도 해당 물질로 인식되는 비율이 높다는 것을 확인하였고, 상대적 소리 차이를 인지함으로써 눈으로 보지 않은 가상환경의 상대적 물체 충돌 속성을 짐작하는 것이 가능함을 확인하였다.

## V. 결론

본 논문에서는 소리를 통해 가상환경의 상황을 전달할 수 있는 청각적 인터랙션 디자인 방법을 제시하였다. 실시간의 충돌음 합성에 대해 최소 기본음 샘플을 바탕으로 디자인적 변형이 가능하고, 충돌 상황의 인지적 특성을 반영할 수 있는 모델임에 의의가 있다. 그러나 형태 차이에 의한 충돌음 전달력에 한계를 보였으며, 실제 소리에 의한 사람의 형태인지 능력을 실험하여 해당 정밀도 수준의 형태 차이를 소리로서 전달할 수 있도록 개선할 필요가 있다. 향후 연구는 충돌 외 마찰, 주기적 사운드 등 보다 다양한 소리 발생 상황을 다룰 수 있도록 할 것이다.

## 참고 문헌

- [1] 김태현, 나일주, "이러닝 콘텐츠에서 비음성 사운드에 대한 학습자 인식 분석", 한국콘텐츠학회논문지, 제10권, 제7호, pp.470-480, 2010.
- [2] R. Corbett, K. Doel, J. E. Lloyd, and W. Heidrich, "TimbreFields: 3D Interactive Sound Models for Real-Time Audio," Presence, Vol.16, No.6, pp.643-654, 2007.
- [3] D. Keller and J. Berger, "Everyday Sounds: Synthesis parameters and perceptual Correlates,"

Proceedings of the Brazilian Symposium on Computer Music (SBCM 2001), 2001.

- [4] C. Zheng, *Physics-Based Sound Rendering For Computer Animation*, Ph.D Thesis, Department of Computer Science, Cornell University, August 2012.
- [5] Y. Visell, F. Fontana, B. L. Giordano, R. Nordahl, S. Serafin, and R. Bresin, "Sound Design and Perception In Walking Interactions," Int. J. of Human-Computer Studies, Vol.67, pp.947-959, 2009.
- [6] D. Lloyd, N. Raghuvanshi, and N. K. Govindaraju, "Sound Synthesis for Impact Sounds in Video-Games," ACM I3D, pp.55-61, 2011.
- [7] 이정선, 주성분 기반 음원 모델링을 통한 실시간 충돌 사운드 재현 연구, 이화여자대학교 대학원 석사학위 청구논문, 2006.
- [8] D. Rocchesso and F. Fontana, (Eds.), *Sob Book : The Sounding Object*, PHASAR Srl Publishing Company, 2003.
- [9] K. Doel, P. G. Kry, and D. K. Pai, "FoleyAutomatic : Physically-based Sound Effects for Interactive Simulation and Animation," Siggraph, pp.537-544, 2001.

## 저자 소개

남 양 희(Yang-Hee Nam)

정회원



- 1989년 2월 : 이화여자대학교 전자계산학과(이학사)
  - 1991년 2월 : KAIST 전산학과(공학석사)
  - 1997년 8월 : KAIST 전산학과(공학박사)
  - 2002년 8월 ~ 현재 : 이화여자대학교 디지털미디어학부 부교수
- <관심분야> : 인터랙티브 미디어, 증강현실, HCI