

가상환경의 시뮬레이션을 위한 충돌반응 양상의 논리적 모델링

김 병 주[†] · 박 종 희^{††}

요 약

본 논문에서는 지표면을 향해 낙하하는 자유 물체의 충돌 현상에 대해 모델링하고자 한다. 이를 위해 최소한의 근원적인 요소를 찾아서 최대한의 다양성을 제공하고자 한다. 몰입감있는 가상환경 구축을 위해 보다 사실적이고 논리적으로 동작하는 충돌 현상을 표현하는데 설계의 초점을 둔다. 이를 위해, 낙하 물체의 재료(material)적 특성에 대한 범위(domain)를 결정하고 우성력(dominant force)을 선택할 것이며, 힘과 지표면에 대한 모델링을 구축할 것이다. 이는 충돌 후 발생하는 결과들을 정량적인 면뿐만 아니라 정성적인 면에서도 충족시킬 수 있다. 아울러 기존에 많은 연구가 진행된 충돌 검출 보다는 충돌 반응 양상에 모델링의 초점을 둘 것이다.

A Logical Model of Collision Response for Simulation of the Virtual Environment

Byung-Ju Kim[†] · Jong-Hee Park^{††}

ABSTRACT

In this paper, we model the downward collision of a falling object to the base. We aim to provide maximum diversity of response to physical collision. To this end, the primary design concern of the model is to unfold the collision phenomenon in a logical and natural manner, detailed enough to construct an immersive virtual environment. To achieve these requirements, first we determine domains for the characteristic of the material of the falling objects, and select the dominant force of the collision. We formulate the collision phenomena with combination of primitive attributes and their relationships. The formulated function evaluates the results of the collision in qualitative aspects as well as in quantitative aspects. Between the collision issues, 'Collision Detection' and 'Collision Response', this paper focuses on Collision Response issue.

키워드 : 충돌 반응 양상(Collision Response), 근원적인 요소(Primitive Factor), 동등 객체(Peer Object)

1. 서 론

본 논문에서는 가상환경 시뮬레이션의 중요한 요소인 물리적 충돌 현상에 대한 모델링을 제시하고, 시각적인 모델링뿐만 아니라 논리적으로 모순이 없도록 시공간과 그 안에 존재하는 물리적 객체를 논리적인 요소에 기반을 두어 모델링 하고자 한다.

기존의 연구 방식 중, 정성적 물리학(Qualitative Physics)은 인간이 갖고 있는 자연 세계에 대한 정성적인 지식을 밝혀내어 컴퓨터 프로그램으로 구현한다는 목표를 갖고 있다는 점에서 본 연구 내용과 유사하다. 위 연구 분야는 충돌 현상을 다룸에 있어서 필요한 제약조건을 지식 기반(knowledge base)의 제약조건표(constraint table)로부터 추출하고, 이들을 통해서 반응 양상을 보여준다[1]. 이는 지식

기반에 저장된 제약조건만을 이용해서 결과를 보여줄 수 있으므로 다양한 상황에 대처할 수 있는 다양성을 보여주기에는 부적합하다. 또한 각 상황별로 필요한 제약조건을 정의해야하므로, 새로운 어플리케이션에 적용하기 위해선 이에 필요한 새로운 제약조건 정의가 필요하다.

충돌 현상의 시뮬레이션에 관한 연구는 특히 게임 분야에서 활발히 진행되고 있다. 초기에는 물리학적 운동 법칙을 적용시키지 않고 상황에 맞게 제작자가 직접 물리학적 이론에 근거한 운동을 할 수 있도록 물체의 움직임 일일이 계산하여 지정해 줌으로서 시각적인 사실성을 높이기 위한 그래픽적인 렌더링에 중점을 두었다. 이러한 방식은 비용 측면이나 재사용적인 측면에서 단점이 크므로 최근에는 자동적으로 물리학적 운동 법칙에 의거한 물체의 움직임이 계산되는 방식을 사용하고 있다. 하지만 이 또한 특정 상황에 중속적인 물리법칙을 적용할 뿐 객체 자체의 논리적인 행위나 객체의 행위의 원인이 되는 근원적인 요소(primitive factor)에 대해서는 고려하지 못하였다.

[†] 정 회 원 : 경북대학교 대학원 전자공학과
^{††} 정 회 원 : 경북대학교 전자공학과 교수
 논문접수 : 2004년 4월 28일, 심사완료 : 2004년 12월 6일

앞에서 제시한 기존의 연구 분야들은 단순히 결과를 보여 주기 위해 노력한다. 이와 달리 본 논문에서는 결과의 원인이 되는 요소들을 찾고, 이들 요소들의 관계를 맺어줌으로써 다양한 객체들과 상황들에 적용 가능한 충돌현상의 시뮬레이션에 대한 모델을 제시하고자 한다. 이러한 목적으로, 충돌과 관련한 법칙들을 정립하기 위해 가능한 한 최소한의 근원적인 요소를 정의할 것이고, 이들 간의 관계를 통해서 최대한의 다양성을 보여주하고자 한다.

충돌 현상에 관한 연구는 충돌 검출(Collision Detection)과 충돌 반응 양상(Collision Response)이라는 두 부분으로 나눌 수 있다. 현재까지의 많은 연구 결과들은 충돌 검출에 중점을 두고 설계하였다. 따라서 본 논문은 이미 많은 연구 결과가 존재하는 충돌 검출부분은 기존의 연구 결과를 이용할 것이고, '충돌 반응 양상'의 설계에 초점을 둘 것이다[2,3].

여기서 설계할 모델의 궁극적인 목적은 복잡한 실제세계와 완벽하게 일치하도록 구현하는 것이 아니라, 사람이 보기에 자연스럽다고 느낄 수 있도록 모델링하는 것이다. 이를 충족시키기 위해, 우선 낙하 물체의 재료의 특성에 대한 범위(domain)를 결정할 것이고, 충돌 현상에서 중점이 될 '우성력(dominant force)'에 대한 논의를 할 것이며, Base뿐만 아니라 다른 객체와의 충돌에 대해서도 고려할 수 있도록 '동등 객체(Peer Object)'에 대한 개념도 추가할 것이다. 근원적인 요소들과 그들 사이의 관계의 조합을 통해 충돌 현상을 수식화할 것이다. 이렇게 수식화된 함수들은 정량적인 면뿐만 아니라 정성적인 면에서도 충돌 현상의 결과를 보여줄 수 있게 한다.

이 모델의 장점으로서는 먼저, 최소한의 근원적인 요소들과 이들 간의 관계를 통해서 충돌 현상의 결과로 나타난 반응 양상을 최대한 다양하게 제공해 줄 수 있다는 것이다. 이를 통해 자연스러움과 사실성을 제공하여 사용자의 흥미를 유발하는 밑바탕이 될 수 있다. 다음으로, 제시한 모델의 시스템 구조는 변경하지 않고 어플리케이션에서 필요로 하는 정밀도의 수준에 맞춰 수식을 정교화함으로써 다양한 어플리케이션에 적용가능할 것이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저, Base와 이에 관여하는 객체들을 모델링할 것이고, 그것들의 범위를 적절히 설정할 것이다. 다음으로 충돌 반응 양상을 정성적인 측면에 초점을 두어서 수식화할 것이다. 또한 동등 객체를 모델링하여 Base뿐만 아니라 다른 객체와의 충돌 현상도 다룰 수 있게 할 것이다. 마지막으로 제시한 모델을 요약하고, 향후 과제에 대해 언급할 것이다.

2. 관련 연구

2.1 정성적 물리학

인공지능 시스템은 질량, 온도, 부피, 압력 및 이들 사이의 관계 등에 대한 물리적인 성질에 대해서도 추론할 수 있어야 한다. 물체가 떨어지고, 공이 날아가고, 물체들끼리 충돌

하는 등의 물리현상들은 물리학에서 다양한 수식들로 기술된다. 이러한 수식을 인공지능에서도 사용할 수 있을 것이다. 그러나 물리학에서와는 달리 정확한 결과값이 필요없는 경우가 많다. 이를 위해 정확한 계산없이 일반적인 경향을 추론할 수 있는 정성적 물리학을 발전시켰다.

실제로 자동차 충돌 사고에 있어서, 시간의 경과로 인한 사고 상황 보존의 어려움, 목격자의 부재 등으로 인하여 완벽한 수치 정보를 얻는 것이 어려운 실정이다. 또한, 완벽하고, 정확한 정량적 사고 관련 자료를 갖고 있다하더라도, 자동차 충돌 사고 분석시 실제로 70% 이상의 경우는 정확한 동역학의 계산 과정 없이 정성적인 분석만으로 재구성이 충분하다[4]. 이런 경우에는 정확한 계산에 의한 분석은 불필요하게 보인다. 정성적 정보에 기초하여 추론을 하는 정성적 물리학은 자동차 충돌 사고의 많은 경우처럼 정확하고, 완벽한 정량적 정보가 없는 경우, 또는 정확한 정량적 분석이 필요 없는 경우의 문제 해결에 사용되기 위해 개발된 인공지능의 한 분야이다[5]. 정성적 물리학의 목표는 인간이 갖고있는 자연 세계에 대한 정성적인 지식을 밝혀내어 컴퓨터 프로그램으로 구현하는 것이다.

2.2 게임에서의 충돌 현상 표현

지금까지 게임분야에서 충돌 현상을 다룸에 있어서 주요 관심사는 시각적으로 얼마나 현실감이 있으면서 이를 실시간적으로 표현하는데 필요한 비용을 절감할 수 있는가에 있었다[6]. 이를 위해 여러 가지 기법들이 사용되었는데, 크게 두 가지 범주로 나눌 수 있다. 충돌하는 물체가 충돌 후 모양의 변형이 가능한지 아닌지에 따라 강체(rigid body)와 연성체(deformable body)로 구분한다.

- **강체의 충돌 반응 양상**: 강체의 충돌 반응은 크게 두 가지의 경우로 나누어서 생각할 수 있는데, 충돌하는 두 강체의 상대 속도가 비교적 크지 아니면 거의 없는지에 따라 충돌 접촉(colliding contact)과 안정 접촉(resting contact)으로 나뉜다. 충돌 접촉은 물체들이 서로 겹쳐졌을(inter-penetrate)때 다시 떨어뜨리도록 적당히 임의의 힘을 주는 방법인 페널티 방법(penalty method)[7]과 이와는 대조적으로, 물체의 물리적인 성질과 상태를 고려하여, 역학적인 이론에 근거한 계산을 시도한 방법인 해석학적인 방법(analytical method)[8]이 있다.
- **연성체의 충돌 반응 양상**: 연성체들은 외부에서 작용하는 힘 또는 내부적인 위치에너지(potential energy)에 의해 외양이 바뀌게 되는데, 이렇게 변화하는 모양을 기술하는 문제뿐만 아니라, 연성체가 변화하는 방향이나 변화하는 정도 등에 대한 모델링 방법이 확연하지 않다. 연성체에 대한 모델링 방법은 크게 지역적 모델(local model)과 전체적 모델(global model)로 나뉜다. 지역적 모델[9]은 하나의 물체를 유한개의 입자로 구성하고, 각각의 입

자들은 이웃한 입자들과 서로 연결시킴으로써 스프링과 같은 효과를 주어 연성체를 표현하는 방법이고, 전체적 모델[10]은 물체의 모양 변화를 계산하기 위해 입자들의 지역적인 반응을 일일이 살펴보는 작업을 생략하고, 대신 전체적인 물체의 모양에 주안점을 두는 방법이다. 이러한 전체적인 모델은 강제와 달리 물체의 모양이 변화하지만 지역적 모델만큼 자유로운 모양 변화를 표현할 수는 없다. 그러나 모양 변화를 계산하기 위한 시간은 지역적 모델에 비해 매우 작기 때문에 모의실험에서 실시간에 가까운 성능을 원하는 경우에 이용할만하다.

초기의 게임 시뮬레이션은 단순하거나 고정된 경로를 따라 임의로 현상들을 발생시켰다. 그리고 시각적인 사실성을 높이기 위해 그래픽적인 기법에 치중하고 있었다. 즉, 상황을 만드는 제작자가 물체들의 움직임을 지정하도록 하는 운동학적인 모델(kinematic model)[11]에 기반을 둬서, 물체는 제작자가 지정한대로만 움직이게 되고, 이 움직임에는 물리학적 운동 법칙이 적용되지 않는다. 따라서 물체가 보다 사실에 가깝게 운동하는 모습을 보이기 위해 제작자가 직접 물리학적 이론에 근거한 운동을 할 수 있도록 물체의 움직임을 일일이 계산하여 지정해야 하므로 비용이 많이 든다.

이러한 비용 절감을 위해 모의실험을 통해서 자동적으로 물리학적 운동 법칙에 의거한 물체의 움직임이 계산되는 방식인 역학적인 모의실험(dynamic simulation) 방법들에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 위에서 사용된 물리 법칙들은 물체의 행동의 원인에 대해 중점을 둔 것이 아니라 특정 상황의 정확성을 표현하고자 하는데 중점을 두고 있다[12]. 초기의 방법들에 비해서 좀 더 현실적인 시뮬레이션을 보여줄 수 있었고 비용도 절감되었지만, 본 연구에서 추구하는 바인 물체 행동의 원인에 대한 고찰이 부족함에 따라 현실 세계의 복잡성으로 인한 다양한 현상들을 표현하기에는 부족하다.

3. 충돌 반응 양상 모델링

본 논문에서는 지구로 향하는 객체의 움직임을 나타내기

위해 낙하 물체, Base, force를 정성적으로 모델링하고자 한다. 몇몇 일반적인 Base와 낙하 물체를 선택한다. Base 집합의 부분 집합으로는 모래 영역, 초원 영역, 진흙 영역, 바위 영역과 같은 일반적인 형태를 포함한다. 위와 같은 다양한 영역으로 이루어진 복합 영역으로 삼립 지대를 예로 들 수 있을 것이다. 마찬가지로 낙하 물체 집합의 부분 집합으로는 바위, 고무공, 유리컵, 진흙 등의 일반적인 형태를 포함한다. 깨지기 쉬운 객체로 비행기, 단단한 객체로 운석 등을 등장시킬 수 있을 것이다. 위의 두 집합의 부분 집합 사이의 모든 가능한 충돌 형태를 고려해서 그들의 반응 양상을 구할 것이다.

3.1 낙하 물체의 모델링

낙하 물체의 충돌 반응 양상을 수식화하기 위해선 먼저 그 물체를 구성하고 있는 속성들의 규명이 필요하다. 이러한 속성들은 그것들과 연계된 수식의 매개변수로 사용된다. overall positioning은 낙하 물체의 전반적인 행동을 의미한다. 즉, 낙하 물체의 overall positioning은 '질량'과 '모양'과 같은 절대적인 인자와 '속도'등과 같은 상대적인 인자의 함수로 결정되는 값에 영향을 받는다. 여기서 상대적인 인자는 Base나 동등 객체와의 관계로부터 표현된다[13].

$$\text{overall positioning} = f(\text{O.mass, O.shape, velocity(O, B)}, F_c(\text{O, B}))$$

단, [basic shape] = {sphere, polyhedron, prism, pyramid}

$$\text{velocity} = f(\text{gravity, buoyance, extra forces (e.g., wind)})$$

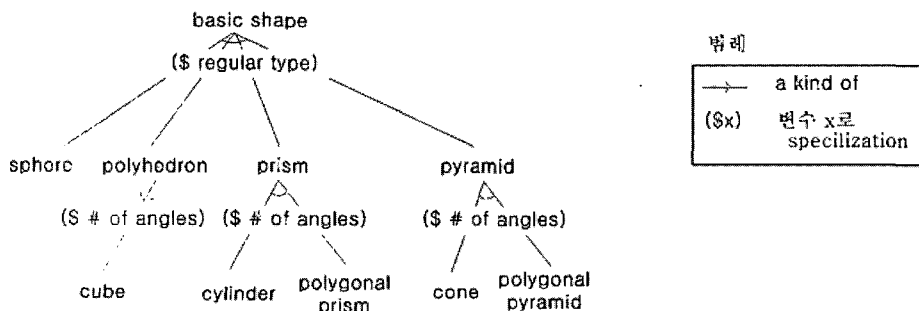
$$\text{composite factor } F_c = f(\text{elasticity, adhesivity, solidity})$$

O : object

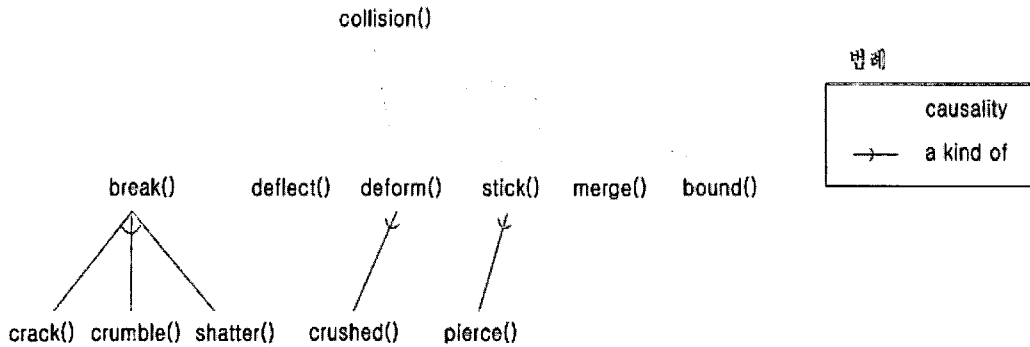
B : base

[x] : 변수 x의 범위

'basic shape'은 (그림 1)과 같은 계층구조로 구체화될 수 있다.



(그림 1) basic shape의 계층구조



(그림 2) collision과 관련된 행위와 행위 계층구조

많은 경우에 객체는 위에서 나타낸 'basic shape'의 결합으로 모델링할 수 있다[14]. 예를 들어 의자는 일반적으로 4개의 다리와 좌판, 등받이 등으로 구성된다. 여기서 다리는 prism(4각 기둥), 좌판과 등받이는 hexahedron을 이용해서 이들의 조합으로 의자를 만들 수 있을 것이다.

충돌 후의 반응 양상은 객체의 모양, 충돌 부위, 충돌 부위에 가해진 힘에 따라서 달라진다. 예를 들어 Base와 충돌하게 되는 부위가 pyramid 형태의 윗 부분이나 아랫 부분이냐에 따라서 Base가 받은 압력의 차이가 크다는 것은 쉽게 알 수 있다.

- **낙하 물체의 행위(action)** : 낙하 물체는 Base와 충돌하면서 다양한 반응 양상을 드러낸다. (그림 2)는 충돌 후 발생할 수 있는 다양한 반응 양상의 특징적인 행위와 이들 행위의 계층 구조를 보여준다. 이들 각 행위들은 overall positioning 함수의 매개변수들의 조합으로부터 산출된다. 즉, (그림 2) 그래프의 각 노드는 overall positioning 함수의 범위가 된다.

이들 행위들은 'shape'과 'movement' 측면에서 범위를 나눌 수 있다.

$$\begin{aligned}
 [\text{overall action}] &= \{\text{shape} : \text{break} \mid \text{deform} \mid \text{sustain}\} \\
 &+ \{\text{movement} : \text{bound} \mid \text{pileup (not merged)} \\
 &\mid \text{stick} \mid \text{merge} \mid \text{deflect} \mid \text{land} \\
 &(\text{with no bounce or stick})\}
 \end{aligned}$$

이들은 따로따로 발생하는 것이 아니라 복합적으로 일어난다. 예를 들어 비행기가 산과 충돌했을 경우, 비행기는 산을 파고들 것이며 그것의 shape은 찌그러지거나 깨질 수 있을 것이다.

'shape'의 변화는 충돌시에 받게 되는 '압력'에 따라 결정된다. 압력은 '힘/작용면적'으로 구해지며 일반적으로 불균일하다.

$\text{cohesivity} < F/A$	일 때, 'break'
$\text{flexibility} < F/A < \text{cohesivity}$	일 때, 'deform'
$F/A < \text{flexibility}$	일 때, 'sustain'

단, F : 받은 힘

A : 힘이 미치는 면적

충돌시 받게 되는 압력이 그 객체의 cohesivity보다 크다면 깨지게 되고, cohesivity보다는 작고 flexibility보다 크다면 변형된다. 마찬가지로 flexibility보다도 작다면 아무런 변화가 없게 된다.

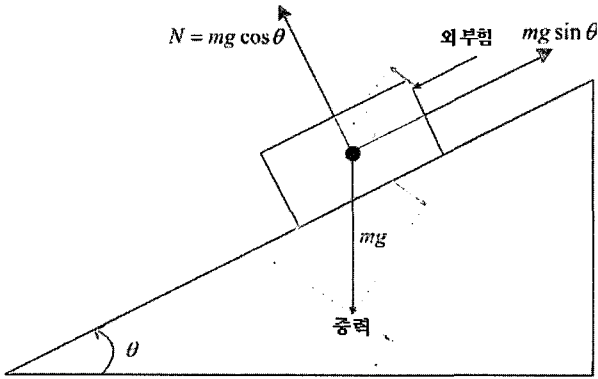
'movement'의 각 행위들은 3.3, 3.4, 3.5절의 모델링을 통해서 구체적으로 표현된다.

- **미시적 관점에서의 낙하 물체가 받는 압력** : 하나의 객체는 미시적 관점에서 작은 입자들이 모여서 이루어지고, 그들은 서로간에 인력으로 묶여져 있다고 생각할 수 있다. 충돌시 객체가 받게 되는 압력과 입자들 사이의 cohesivity에 따라서 그들 사이의 인력이 약해지게 될 것이다. 압력을 받은 지점으로부터 멀어질수록 미치는 힘이 적게 되어 입자들 사이의 인력이 끊어질 확률은 작아진다. 압력을 받은 면적과 세기, 방향을 인자로 해서, 객체의 깨짐의 정도를 수식화 할 수 있다.

3.2 Base의 모델링

Base에 대해 특히 고려해야 할 요소로는 '마찰력'과 '기울기'이다. 경사가 있는 Base에 객체가 놓일 경우, 객체는 중력의 영향을 받아서 낮은 지점으로 이동하게 될 것이고, Base가 지닌 마찰력은 그 객체의 움직임을 방해할 것이다. Base에 충돌한 객체에 작용한 모든 힘이 균형을 이룰 때까지 객체의 움직임은 계속된다.

본 논문에서는 Base에 대해 크게 세 부분으로 분류한다. Base의 요소(factor)들, 즉 solidity, adhesivity, elasticity 값에 따라 가장 영향력이 높은 요소를 '우성 요소(dominant factor)'로 잡고, (그림 3)에서처럼 여러 가지 재질, 예를 들어 rubber, metal, mud를 규정할 것이다. elasticity가 우성 요소인 space의 예로 meadowy base, adhesivity가 우성 요소인 space의 예로 muddy base, solidity가 우성 요소인 space의 예로 rocky base로 표현할 것이다.



(그림 3) 미끄러짐 & 구름

• 미끄러짐(Sliding) : $\frac{f}{N} = \frac{mg \sin \phi_s}{mg \cos \phi_s} \Rightarrow \mu_s = \tan \phi_s$

기울기 각도 θ 가 ϕ_s 보다 커지면 움직임을 막는 데 필요한 힘이 가능한 최대 마찰력을 넘게 되며, 그러면 벽돌이 미끄러지기 시작한다.

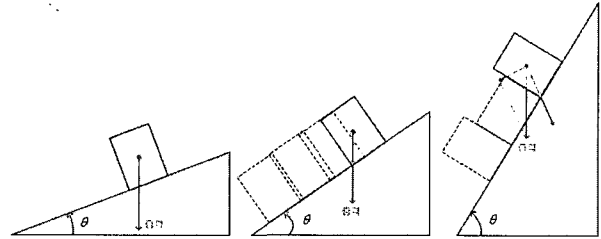
또한 $\mu_d < \tan \phi < \mu_s$ 라면 정지된 벽돌의 상태가 불안정하므로, 약간의 충격만 가해도 벽돌이 미끄러지기 시작한다. 단, μ_d 는 운동 마찰 계수이고, μ_s 는 정지 마찰 계수이다[15].

• 구름(Rolling) : 구름에 관여하는 힘은 토크이다. 토크의 산출을 위해, (그림 3)처럼 객체의 base와의 접촉면 중에서 힘을 가한 방향으로 가장 먼 지점을 축으로 하여 객체에 가해진 힘(예를 들어, 중력과 외부 힘)을 토크와 구심력으로 분해한다.(여기서 토크는 '작용점과 축 사이의 거리'와 '가해진 힘'을 곱한 값에 비례한다.) 이러한 토크는 Base와 객체사이에 마찰력이 존재해야만 발생할 수 있다. 즉, 둘 사이의 마찰력이 없다면, 회전의 축이 생기지 못하므로 토크는 생기지 않는다.

외부에서 가해진 힘과 중력을 각각 구심력과 토크로 분해해서 토크의 합력을 구하면 그것의 방향은 Base를 향하거나 그렇지 않을 것이다. 토크의 방향이 Base를 향하지 않으면 접촉면의 끝점을 축으로 해서 구르게 되고, 그렇지 않으면 구르지 않게 된다.

(그림 4)는 미끄러지거나 구르는 경우의 간단한 예를 보

여준다. (그림 4)(a)는 θ 가 ϕ_s 보다 작고 토크가 Base를 향하므로 움직임에 변화가 없는 경우이고, (그림 4)(b)는 θ 가 ϕ_s 보다 커서 미끄러지는 경우이며, (그림 4)(c)는 토크가 Base를 향하지 않으므로 구르게 되는 경우이다. (그림 4)(c)처럼 구르게 되는 경우에는 일단 토크가 발생하면 중력(혹은 외부 힘)에 의해 회전하고 있는 반대 방향으로 생기는 토크보다 클 때까지 계속 구르게 된다.



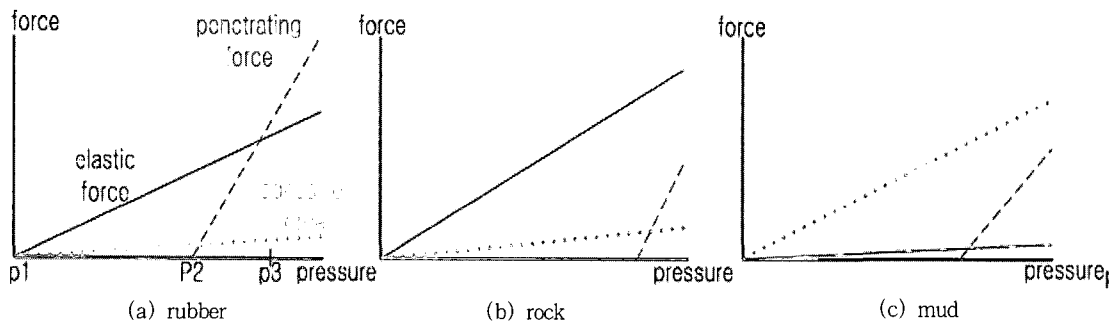
(a) 움직이지 않음 (b) 미끄러짐 (c) 구름

(그림 4) 미끄러짐, 구름 예제

3.3 Force의 모델링

객체들 간의 충돌현상을 다루기 위해선 그들의 반응 양상에 근간이 되는 'force'에 대한 정립이 필요하다. 이를 위해 우선적으로 force의 속성에 대해 논의한다. force의 구체적 예는 '세기', '방향', '작용점'으로 표현된다. 즉, force = f(intensity, θ_f , p)이고, p = (v, h)로 표현될 수 있다. 단, intensity ≥ 0 , $\theta_f = \{180 > \theta_f > -180\}$, $v \in V$ (vertical span), $h \in H$ (horizontal span).

두 객체(여기선, 낙하 물체와 Base)가 충돌할 때, Base가 받은 압력의 세기에 따라 우세를 점하게 될 세 가지 종류의 force를 기술할 필요가 있다. (그림 5)에서 보는 바와 같이 Base의 종류와 인가된 압력에 따라 가장 우세를 점하게 되는 힘을 결정할 수 있다. (그림 5)의 X축은 충돌시 받게 되는 압력을 나타내고, Y축은 충돌시 받은 압력에 따라 가장 우세를 점하게 되는 힘을 보여준다. 즉, 'rubber'라는 Base에 p1과 p2 사이의 압력이 인가된다면 'elastic force'가 우성력이 되고, 충돌한 객체는 공처럼 튕 준비를 하게 되는 것이다. 마찬가지로 우성력이 'penetrating force'나 'adhesive force'가 된다면, 'rubber' 성질을 지닌 Base에 박히거나 달라붙게 된다.



(그림 5) 물리 객체의 움직임의 모델링

다른 두 힘과는 달리 'elastic force'는 얼마간의 지연(객체의 변형 후 원래의 모양으로 되돌아오는데 걸리는 시간) 후에 발생된다. 이를 바탕으로 각각의 힘은 $F_{ela}(p(t+\Delta t))$, $F_{adh}(p(t))$, $F_{pen}(p(t))$ 으로 표현될 수 있다[13].

위에서 나타낸 세 가지 힘은 충돌하는 객체의 성질에 따라서 달라진다.

$$F_{ela}(x) \propto \max[A_c(x)] \cdot O.velocity \cdot (O.elasticity/B.elasticity)$$

$$F_{pen}(x) \propto 1/A_{con}(x) \cdot B.solidity$$

$$F_{adh}(x) \propto A_{con}(x) \cdot O.adhesivity \cdot B.adhesivity$$

단, x : 뚫고 들어간 깊이

$\max[A_c(x)]$: 충돌하는 두 객체가 접할 수 있는 최대 cross-section

$A_{con}(x)$: 충돌하는 두 객체가 접하는 표면적

3.4 탄성 객체의 Base와의 충돌

탄성을 지닌 객체가 다른 객체와 충돌할 경우, 각각의 복원력은 상대방의 수축의 정도에 따라 달라질 것이다. 즉, '힘을 가한 객체'(activeObject)의 탄성력(elasticity)이 크면 클 수록 '힘을 받은 객체'(passiveObject)의 수축의 정도가 작아져서, 힘을 가한 객체의 복원력은 당연히 줄어들 것이다.

$$\text{passiveObject의 복원력} = \frac{\mu_1}{\mu_1 + \mu_2} * (\mu_1 * \text{for ce})$$

$$\text{activeObject의 복원력} = \frac{\mu_2}{\mu_1 + \mu_2} * (\mu_2 * \text{for ce})$$

단, μ_1 = passiveObject의 elasticity

μ_2 = activeObject의 elasticity

Base는 '지지력(supporting force)'이 거의 무한대라고 생각할 수 있으므로 Base에 충돌하는 객체가 최종적으로 받게 되는 힘은 passiveObject와 activeObject의 복원력을 더한 값이 된다.

3.5 물리적 객체의 Base를 향한 파고듦(Penetration)

파고듦에 관한 현상은 충돌에 관여하는 두 객체사이의 solidity에 따라서 크게 달라진다. 여기서 충돌하려는 객체와 Base사이의 관계로 기술할 것이다. 즉, 충돌하려는 객체는 activeObject가 될 것이고, Base는 passiveObject가 된다. 충돌시 고려해야할 충격량은 객체가 받은 운동량의 변화와 같다. passiveObject의 solidity가 activeObject의 solidity보다 큰 경우, activeObject가 깨질 정도의 압력이라면 active-Object의 운동량의 변화량만큼 passiveObject는 충격을 받을 것이고, 깨질 정도의 압력이 아니라면 운동량의 변화량만큼 둘 다 같은 양의 충격을 받을 것이다. 반대로 active-Object의 solidity가 passiveObject의 solidity보다 큰 경우에는 운동량의 변화량만큼 둘 다 같은 양의 충격을 받을 것이

다. 이것은 각목을 수도로 내려칠 때, 각목이 깨지면 손에 전해져 오는 충격이 약하지만, 각목이 깨지지 않는다면 충돌하는 순간 가했던 운동량만큼 충격이 손에 전해지는 것과 같은 이치이다.

- activeObject.solidity > passiveObject.solidity 일 때,

$$F(x) = \int_0^d A_c(x) dx \cdot \text{passiveObject.solidity}$$

- activeObject.solidity < passiveObject.solidity 일 때,

$$F(x) = \int_0^d A_c(x) dx \cdot \text{activeObject.solidity}$$

위 식의 F(x)는 충돌하려는 객체가 Base를 뚫거나 혹은 Base가 충돌하려는 객체에 충격을 가해서 깨트리고자 할 때, 이를 방해하는 힘이라고 정의한다. 가해진 힘이 이를 방해하는 힘 'F(x)'보다 클 때까지 파고듦은 계속될 것이다. 여기서 가해진 힘은 이를 방해하는 힘에 의해 계속 감소할 것이다.

$$F_{act}(x(t)) = F_{act}(x(t-1))$$

$$- \int_0^d A_c(x) dx \cdot \text{passiveObject.solidity}$$

단, $F_{act}(x(t))$: 가해진 힘

$F_{act}(x(t))$ 가 0이하가 될 시점, 즉

$$F_{act}(x(t)) = \int_0^d A_c(x) dx \cdot \text{passiveObject.solidity}$$
 일 때

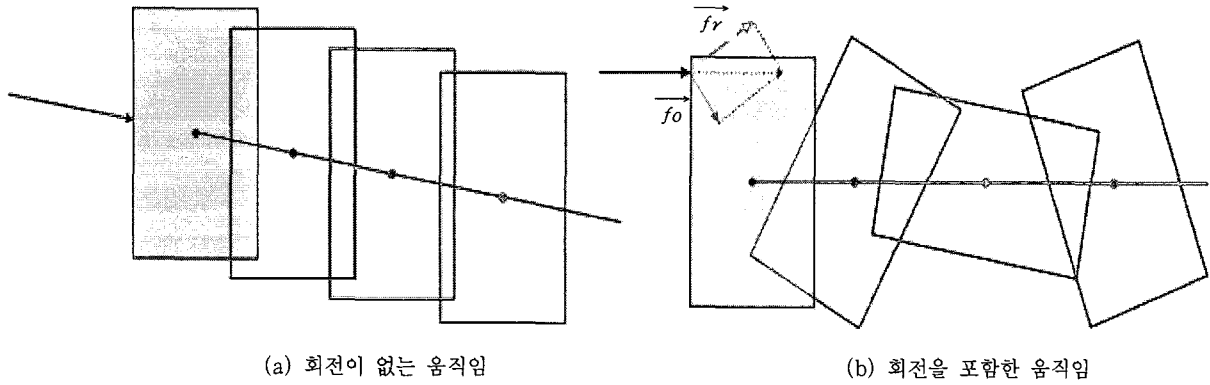
까지 파고듦은 계속 될 것이다. 이때의 x값이 최종적으로 뚫고 들어간 깊이가 된다. 여기서 $f = \frac{dp}{dt}$ 이므로, 운동량의 변화를 구할 수 있다.

3.6 동등 객체와의 충돌

충돌 현상을 다룸에 있어 Base와의 충돌뿐만 아니라, 동등 객체들 간의 충돌에 대한 고려도 필요하다. 앞에서 논의한 내용들은 충돌이 발생했을 경우 '힘을 받은 객체'는 이동이 없다는 가정을 전제로 하였다. 즉, 지지력은 무한대로 가정하고, '힘을 가한 객체'의 반응 양상에 대해서만 기술했던 것이다. activeObject의 힘이 passiveObject의 지지력보다 클 경우에는 passiveObject가 이동하게 되므로, activeObject의 힘이 passiveObject의 지지력보다 크나, 작으냐에 따른 구분이 필요하다.

3.6.1 무게중심(Center of Gravity)

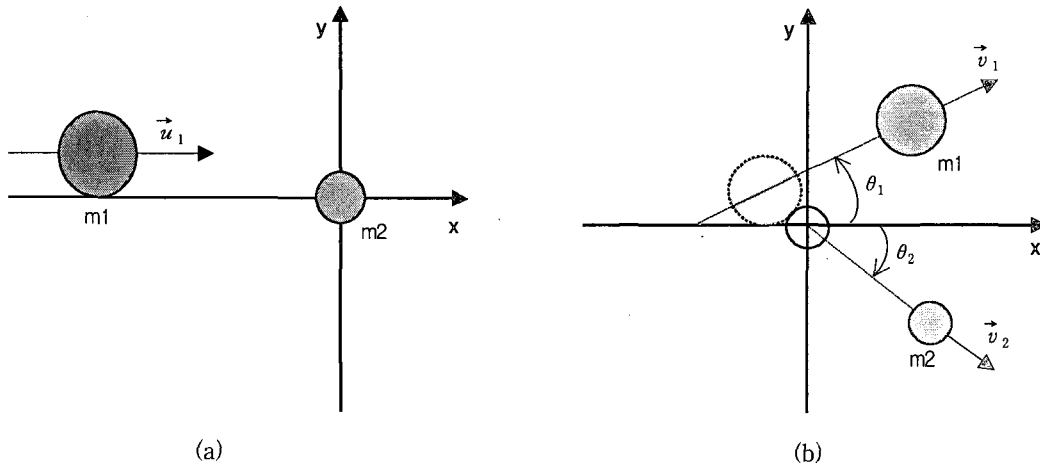
객체의 움직임의 방향을 수식화하기 위해선 '무게중심'에 대한 고려가 필요하다. 만약 객체에 인가된 힘이 무게중심을 향하면, 그 객체는 (그림 6)(a)처럼 회전없이 움직일 것이다. 그렇지 않다면, (그림 6)(b)처럼 회전하면서 앞으로 진행할 것이다. 객체에 인가된 알짜힘(net force)은 진행력(onward force)과 회전력(rotary force)의 합이다.



(a) 회전이 없는 움직임

(b) 회전을 포함한 움직임

(그림 6) 힘을 받은 객체의 움직임



(a)

(b)

(그림 7) 충돌 후 산란각

(그림 6)(b)처럼 인가된 힘은 \vec{f}_r, \vec{f}_o 로 나눌 수 있다. 여기서 \vec{f}_r 은 회전력과 관계된 힘이고, \vec{f}_o 는 진행력과 관계된 힘이다. (그림 6)(a)는 회전력없이 진행력만 존재하므로 회전없이 이동하게 된다.

3.6.2 힘의 분해

이 절에서는 두 객체가 충돌할 때, 에너지 손실이 없음을 가정한다.

3.6.1절에 따라 θ_2 는 '작용점'과 '원의 무게중심'을 지나는 라인의 각도가 된다. (그림 7)(b)는 충돌 후 동등 객체의 이동 방향을 나타낸다. 운동량 보존법칙과 에너지 보존법칙으로부터 θ_1 은 계산될 수 있다[16].

- 운동량 보존법칙과 에너지 보존법칙은 다음과 같다.

$$m_1 \vec{u}_1 = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 \quad (a)$$

$$\frac{1}{2} m_1 u_1^2 = K_1 + K_2 = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 \quad (b)$$

식 (a), (b)를 이용해서

$$v_2 = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} u_1 \cos \theta_2 \quad (c)$$

를 얻어서, 객체 2의 충돌 후의 운동 에너지 K_2 를 구하면

$$K_2 = \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \left\{ \frac{4m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} \cos^2 \theta_2 \right\} \frac{1}{2} m_1 u_1^2 \quad (d)$$

이 된다. 객체 1의 충돌 후 운동 에너지 K_1 은

$$K_1 = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} m_1 u_1^2 - K_2 = \left\{ 1 - \frac{4m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} \cos^2 \theta_2 \right\} \frac{1}{2} m_1 u_1^2 \quad (e)$$

이다.

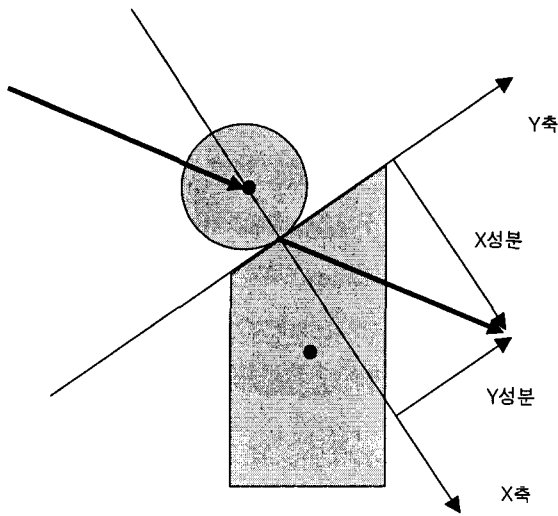
- 운동량 보존법칙의 식 (a)의 y축 성분에서

$$m_1 v_1 \sin \theta_1 = m_2 v_2 \sin \theta_2 \quad (f)$$

이므로, 이 식에 식 (d)와 식 (e)를 대입하면

$$\theta_1 = \sin^{-1} \left[\frac{2m_2 \cos \theta_2 \sin \theta_2}{\sqrt{(m_2 + m_2)^2 - 4m_1 m_2 \cos^2 \theta_2}} \right]$$

본 논문에서는 힘의 분해기법을 제시하고자 한다. (그림 8)은 힘의 분해에 관한 내용을 기술한다.



(그림 8) 힘의 분해

두 객체가 충돌할 때, 인가된 힘은 충돌 지점의 접선에 따라 X축과 Y축으로 나뉜다. activeObject는 가해진 힘의 Y성분은 전부 갖게 되지만, X성분은 두 객체의 질량에 따라 달라진다. 만약 activeObject의 힘이 passiveObject의 지지력보다 작다면, X성분은 전적으로 activeObject가 갖게 될 것이다. 그렇지 않다면, 아래의 수식처럼 그 결과를 나타낼 수 있다.

$$\frac{passiveObject.m}{activeObject.m} < 1 ; X성분의 크기$$

$$= activeObject의 X성분의 크기 - passiveObject의 X성분의 크기$$

$$\frac{passiveObject.m}{activeObject.m} = 1 ; X성분의 크기$$

$$= passiveObject의 X성분의 크기$$

$$\frac{passiveObject.m}{activeObject.m} > 1 ; X성분의 크기$$

$$= activeObject의 X성분의 크기 + passiveObject의 X성분의 크기$$

단, activeObject.m = activeObject의 질량
passiveObject.m = passiveObject의 질량

위의 수식과 함께 (그림 7), (그림 8)을 이용하면 아래의 수식을 유도할 수 있다.

$$activeObject의 X성분 = -\tan(\theta_1 + \theta_2 - 90) * X 성분의 크기$$

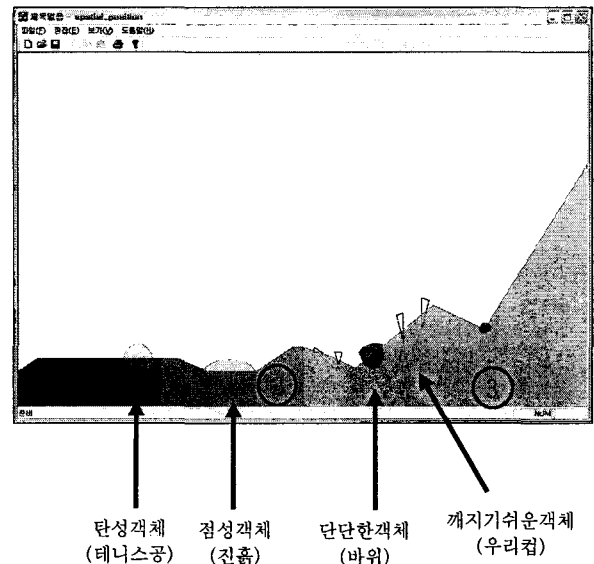
4. 구현 및 실험결과

앞에서 제시한 이론들을 바탕으로 물리 객체들 간의 충돌 현상을 구현할 수 있었다. 등장 객체들은 자신이 지닌 근원적인 요소들과 상대방이 지닌 근원적인 요소들의 조합으로 이루어진 함수를 통해서 다양한 반응 양상을 줄 수 있었다. 시뮬레이션 시스템은 Window 환경에서 Visual C++ 6.0을

이용하여 제작하였고, 세밀한 그래픽 구현보다는 각 현상의 특징들을 나타내는데 구현의 초점을 두었다.

시나리오 : 기본적인 지형은 진흙 영역(muddy region), 풀밭 영역(meadowy region), 바위 영역(rocky region)으로 나뉘어져 있다. 이들 각각은 내·외부의 영향으로 인해 공간적인 위치에 따라 근원적인 요소의 값이 조금씩 다르다. 지형의 전체적인 조감은 약간의 굴곡이 있는 편평한 지형과 산으로 나타낼 수 있다. 산을 지나 초원이 형성되어 있으며, 초원을 지나 바다로 이어지는 진흙 지형이 형성된다. 산에는 여러 가지 바위들이 있으며, 이 바위들은 외부의 영향(비, 바람, 충돌, ...)으로 인해 자신이 지닌 지지력이 달라질 것이다. 바위뿐만 아니라 여러 동등 객체들이 Base에 놓여 질 수 있다.

위에서 갖추어진 지형을 향해서 여러 객체들이 낙하할 것이다. 대기권 안으로 진입한 운석이나 비행기 등이 외부의 영향으로 인해 궤도가 조금씩 바뀔 것이며, Base를 향해 충돌할 것이다. 충돌시의 우성력에 따라 다양한 현상(땅에 들러붙거나 박히거나 튕기)이 발생할 것이며, 충돌시 받은 압력으로 인해 변형되거나 깨질 수 있을 것이다. 충돌 후 Base에 놓이게 되면, 지형에 따라 미끄러지거나(혹은 구르거나) 움직임을 멈출 것이다. 미끄러질 때에는 동등 객체와 충돌이 생길 수 있으며, 충돌시의 우성력과 동등 객체의 지지력에 따라 다양한 반응 양상이 나타날 것이다.



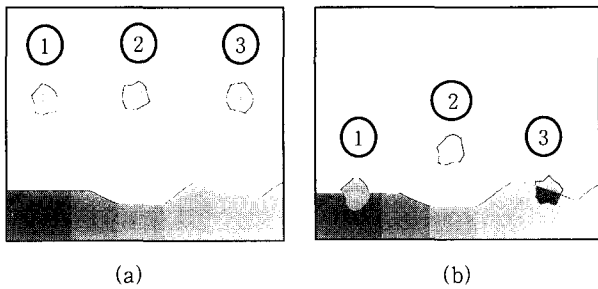
(그림 9) 시뮬레이션 화면

(그림 9)는 전체적인 시뮬레이션 화면을 보여준다. ①, ②, ③ 각각은 muddy base, meadowy base, rocky base를 나타낸다. 이들 각각도 자신이 지닌 우성 요소, 즉 adhesivity, elasticity, 혹은 solidity에 따라서 다른 반응 양상을 보이므로 3단계로 나누었다. 예를 들어 ①의 base는 우성 요소가

adhesivity가 되고, 정도가 높을수록 adhesivity를 높게 지정해 주었다. muddy base, meadowy base, rocky base 각각은 (그림 5)에서 (그림 5)(c), (그림 5)(a), (그림 5)(b)와 같은 특성을 가진다. 이와 마찬가지로 자유 낙하 물체도 자신이 지닌 우성 요소(adhesivity, elasticity, solidity)에 따라 깨지기 쉬운 객체(예. 유리컵), 단단한 객체(예. 바위), 탄성 객체(예. 테니스공), 점성 객체(예. 진흙)로 분류할 수 있다.

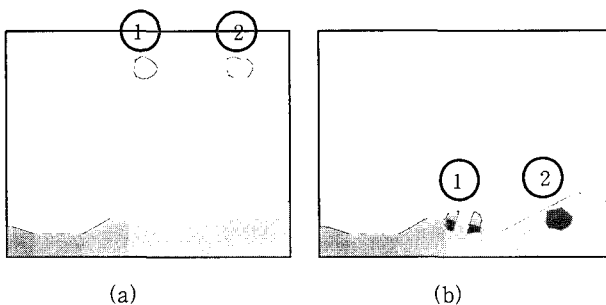
(그림 10)은 Base의 특성에 따라서 충돌 후 낙하 물체가 보이는 반응 양상을 나타낸다. 충돌 시 (그림 5)의 그래프에 따라 우성력이 결정되고, 이에 따라 여러 가지 다른 반응 양상을 보이게 된다. 단, 여기서 ①, ②, ③은 모두 무게와 성질이 같은 객체다.

①은 Base와 충돌 후 adhesive force가 우성력으로 결정되고 이에 따라 Base에 달라붙는다. ②는 elastic force가 우성력이므로 튀게 된다. 이와는 달리 ③은 penetrating force가 우성력이 되지만, 낙하 물체의 solidity가 Base의 solidity보다 크므로 낙하 물체가 거의 모든 압력을 받게 된다. 이렇게 받은 압력을 3.1절의 내용으로 해석하면 (그림 10)(b)의 ③처럼 금이 생긴다.



(그림 10) Base의 특성에 따른 충돌 반응 양상

(그림 11)은 Base와 낙하 물체의 solidity에 따라서 충돌 후 보이게 되는 반응 양상을 나타낸다. 그림에서 두 부분으로 나뉜 rocky base가 보이는데, 아래 영역의 solidity는 단단한 객체의 solidity보다 크고, 윗 영역의 solidity는 단단한 객체의 그것보다 작다. 충돌 시의 압력에 의해 우성력은 penetrating force가 된다.



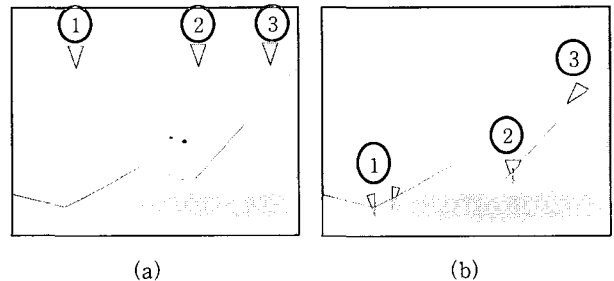
(그림 11) 낙하 물체와 Base의 solidity에 따른 충돌 반응 양상

위의 그림에서 ①, ②가 충돌 후 받게 되는 압력은 같다.

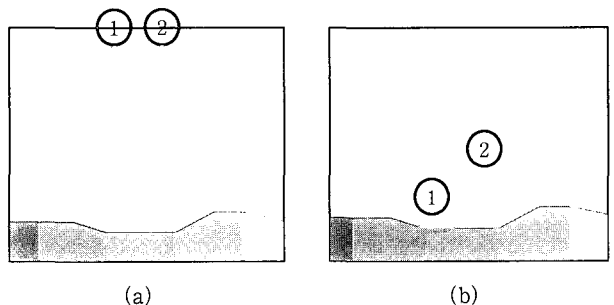
3.5절의 내용을 따르면, ①의 경우에는 낙하 물체의 solidity가 Base의 solidity보다 작으므로 낙하 물체가 거의 모든 압력을 받게 되고, ②의 경우에는 낙하 물체의 solidity가 Base의 solidity보다 크므로 Base가 거의 모든 압력을 받게 된다. (그림 3.1)의 수식에 따라 ①의 낙하 물체는 받은 압력이 자신이 지닌 cohesivity보다 크므로 깨지게 된다. ①과는 달리 ②의 객체는 3.5절의 수식에서 연산된 깊이만큼 Base를 파고들게 된다.

앞의 구현내용은 Base의 관점에서 자신이 지닌 특성에 따른 반응 양상을 보였었다. 여기서부터는 낙하 물체의 관점에서 자신이 지닌 특성에 따른 현상들을 보이겠다.

(그림 12)에 등장시킨 객체는 깨지기 쉬운 객체이다. 다른 객체들에 비해 cohesivity가 낮으므로 작은 충격에도 쉽게 깨지게 된다. (그림 12)(a)에서 보듯이 같은 성질과 무게를 지닌 객체를 일정한 높이에서 떨어뜨렸다. 충돌 시 받게 되는 압력은 이동거리에 비례하므로, 깨지기 쉬운 객체가 받게 되는 압력의 세기는 ①, ②, ③의 순서가 된다. ①이 받은 압력은 자신의 cohesivity보다 훨씬 커서 깨지게 된다. 그러나 ②는 자신이 받은 압력이 cohesivity보다는 크지만 깨질 정도의 세기는 아니므로 3.1.1절의 내용처럼 금만 생기게 된다. 마지막으로 ③은 자신의 cohesivity가 받은 압력보다 크므로 객체 자체에는 아무런 변화가 없게 된다.



(그림 12) 낙하 물체가 받는 압력에 따른 충돌 반응 양상



(그림 13) Falling Entity의 flexibility에 따른 충돌 후 반응 양상

객체의 shape의 변화는 3.1절의 내용처럼 cohesivity뿐만 아니라 flexibility에 의해서도 결정된다. (그림 13)에서 보듯이 ①, ② 두 객체는 모양과 무게가 같다. 또한 같은 높이에서 떨어지므로 충돌 시에 받게 되는 압력도 같게 된다. 그러나 ①은 자신의 우성 요소인 adhesivity에 의해 Base에 들러붙

게 되고, 받은 압력이 자신의 flexibility보다 크므로 자신의 shape에 (그림 13)(b)처럼 변형이 생긴다. ②의 객체는 받은 압력이 자신의 flexibility(혹은 cohesivity) 보다 크지 않으므로 shape에는 변화가 없게 되고, 우성력인 탄성 객체와 자신의 elasticity에 의해 그림처럼 튀게 된다. 충돌 후 ②의 객체는 3.4절의 수식에서 연산된 복원력만큼 튀어 오른다.

5. 결론 및 향후 과제

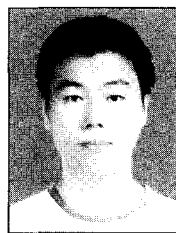
몰입감 있는 가상 환경을 구축하기 위해서는 환경내에서 발생할 수 있는 여러 현상들을 정교하게 모델링할 필요가 있다. 본 논문에서는 연구의 첫 단계로, 자유 낙하 충돌 현상에 대한 모델을 제안한다. 즉, Base와 낙하 물체 각각을 모델링하고, 우성력을 결정해 줌으로써 낙하 물체가 반응할 수 있는 현상들을 보여줄 수 있었다. 게다가 동등 객체의 개념을 추가함으로써 Base뿐만 아니라 다른 객체와의 충돌현상도 고려할 수 있었다. 근원적인 요소들과 그들의 관계를 통해서 최대한의 다양성을 제공해 줌으로써 사람들에게 자연스러움과 신뢰성을 줄 수 있다. 게다가 제시한 모델의 시스템 구조는 변경하지 않고 어플리케이션에서 필요로 하는 정밀도의 수준에 맞춰 수식을 정교화함으로써 다양한 어플리케이션에 적용가능할 것이다.

본 논문에서는 일정 수준 이상의 크기와 다양한 모양을 지닌 객체들의 충돌에 대해서만 다루었다. 즉, 모래사막과 같이 비슷한 크기와 모양을 지닌 재료들이 한데 뭉쳐서 충돌을 일으키는 현상에 대해서는 고려하지 않았다. 이에 관한 모델링은 본 논문에서 제시한 방법들로는 많은 제약이 있을 것이므로, 이들의 그룹을 하나의 객체로 인식하는 방법 등과 같은 새로운 모델링 기법이 필요할 것이다. 또한 복잡한 임의의 객체에 대한 충돌 반응 양상도 다룰 수 있도록 수식을 다듬을 필요가 있을 것이다. 마지막으로 2D로 구현한 시뮬레이션을 3D로 변환하는 작업이 필요할 것이다. 이들을 통해 좀더 현실감 있는 충돌 반응 양상을 보여줄 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] Sukhan Lee and Judy Chen, "Building Models for Reasoning in Qualitative Physics," *Proceedings of the IEEE*, 1990.
 [2] C. A. Avizzano, "Interactive Collision Detection for Deformable Objects in Virtual Environments," *Proceedings of the IEEE*, 1999.
 [3] Matthew Moore, "Collision Detection and Response for Computer Animation," *Computer Graphics*, Vol.22, No.4, August, 1988.
 [4] Baker, L., Freink, L., "The traffic-accident investigation

manual," Northwestern University Traffic Institute, 1986.
 [5] Bobrow, D., "Qualitative reasoning about physical systems," MIT press, 1986.
 [6] Mark Deloura, et al., "Game Programming Gems," *CHARLES RIVER MEDIA, INC.*, pp.550-557, 2001.
 [7] Moor, M. and Wilhelms, J., "Collision Detection and Response for Computer Animation," *Computer Graphics*, 22 (4), pp.289-298, 1988.
 [8] Baraff, D., "Rigid Body Simulation," *An Introduction to Physically Based Modeling*, SIGGRAPH '93 Course Notes, 1993.
 [9] Terasawa, M. and Kimura, F., "Collision Response for Deformable Models Based on the Hertz's Contact Theory," *Proceedings of Pacific Graphics '93*, Vol.1, pp.45-60, 1993.
 [10] Baraff, D. and Witkin, A., "Dynamic Simulation of Non-penetrating Flexible Bodies," *Computer Graphics*, 26(2), pp. 303-308, 1992.
 [11] Magnenat-Thalmann, N. and Thalmann, D., "Computer Animation : Theory and Practice," *Springer*, Tokyo, 1990.
 [12] Chris Hecker, "Physics, part 3 : Collision response," *Game Developers Magazine*, pp.11-18, March, 1997.
 [13] Jong-Hee Park, "Initial Positioning of physical entities," *Technical report, Kyungpook Natl univ.*, AIMM Lab., 2002.
 [14] Jong-Hee Park, "Modeling physical entities and their associated relationships in the cyber world," *Technical report, Kyungpook Natl univ.*, AIMM Lab., 2002.
 [15] Dante Treglia, et al., "Game Programming Gems 3," *CHARLES RIVER MEDIA, INC.*, pp.285-289, 2003.
 [16] 모혜정 외지, "대학물리", *교문사*, pp.112-114, 2002.



김 병 주

e-mail : kbj113@palgong.knu.ac.kr
 2002년 경북대학교 졸업(공학사)
 2004년 경북대학교 졸업(공학석사)
 현재 경북대학교 전자공학과 박사과정
 관심분야 : 인공지능, 가상현실



박 종 회

e-mail : jhpark@ee.knu.ac.kr
 1979년 서울대학교 졸업(공학사)
 1981년 한국과학원 졸업(공학석사)
 1990년 Univ. of Florida 졸업(공학박사)
 1990년~2001년 경북 대학교 부교수
 2001년~현재 경북대학교 전자공학과
 정교수

관심분야 : 멀티미디어 응용, Computer Aided Education, CAD/CAM, 지능형 정보 시스템, 분산 데이터 처리 시스템