

## 이상적인 점탄성체 항복 조건을 이용한 폭발 시뮬레이션

성수경, 김경수, 신병석  
인하대학교 컴퓨터정보공학과  
{rebirth87, hoolist1234}@naver.com, bsshin@inha.ac.kr

### Simulation of Explosion Using the Ideal Viscoelastic Object Yield Condition

Su-Kyung Sung, Gyeong-Su Kim, Byeong-Seok Shin  
Dept. of Computer Science and Information Engineering, Inha University

#### 요약

입자 기반 유체 시뮬레이션에서 유체와 완전탄성체의 중간 형태인 점탄성체는 유체와는 달리 물질의 변형에 대한 항복응력(yield stress)이 필요하다. 기존 입자 기반의 점탄성체 연구에서는 폰 미세스(von Mises) 항복조건을 사용해 점탄성체의 변형을 표현하였으나 폭발을 표현하지는 못하였다. 본 논문은 물체가 받는 수많은 방향의 힘을 계산해야 하는 폰 미세스의 항복조건과는 달리 최대 주응력과 최소 주응력의 차를 이용해 쉽게 근사 할 수 있는 트레스카(Tresca)의 항복조건을 변형한 이상적 점탄성체 항복조건을 제안한다. 폰 미세스의 항복조건을 쉽게 근사화하기 위해 물체가 받는 힘을 변형된 길이로 표현한 기존 입자 기반의 시뮬레이션과 달리, 본 논문은 트레스카의 항복조건을 바탕으로 2차원 물체가 힘을 받아 변형된 넓이를 주응력으로 가정한다. 가장 큰 힘을 받는 순간을 최대주응력, 가장 적은 힘을 받는 순간을 최소 주응력으로 근사 화하여 차이를 계산한다. 점탄성체의 경계면이 이상적 항복 조건 이상으로 줄어들 때 물체가 한계응력을 이기지 못하고 현실감 있게 폭발하는 과정을 표현할 수 있음을 확인하였다.

#### ABSTRACT

In particle-based fluid simulation, the yield stress is required for the deformation of the viscoelastic material like gel. von Mises's yield condition has been proposed to implement deformation of viscoelastic objects, but did not express the explosion. Furthermore, von Mises's yield condition is hard to approximate. We propose an ideal yield condition for viscoelastic object that reference from Tresca's yield condition. Unlike conventional particle-based simulation approximate the external power by the deformed length of the object, this paper is approximate the external power by area of the object. We check up that explosion was realistic when a viscoelastic object is compressed under the ideal yield condition.

**Keywords** : Fluid Simulation(유체 시뮬레이션), SPH, Realtime Simulation(실시간 시뮬레이션), Viscoelastic Simulation(점탄성 시뮬레이션)

Received: Oct. 15, 2014 Accepted: Nov. 20, 2014  
Corresponding Author: Byeong-Seok Shin(Inha University)  
E-mail: bsshin@inha.ac.kr

© The Korea Game Society. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ISSN: 1598-4540 / eISSN: 2287-8211

## 1. 서 론

영화나 게임에서 액체의 움직임을 표현하기 위하여 유체 시뮬레이션이 주로 사용된다. Reeves 등은 유체 및 연기나 불을 표현하기 위해 입자시스템을 제안하였다[1]. 다량의 입자들로 구성된 유체 데이터는 최신 하드웨어를 사용하더라도 실시간으로 렌더링 하기 어렵다. 일반적으로 유체 입자의 효율적인 렌더링을 위하여 SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics) 기법이 사용된다[10]. SPH는 천체물리학 분야에서 발전된 것으로 나비에-스톡스(Navier-Stokes) 방정식을 적용한 기존 입자 시스템에서 많이 사용되는 보간 방법이다. 이것은 하나의 입자가 가진 커널 범위 내에 존재하는 이웃 입자들이 비슷한 성질을 갖도록 한다.

이 논문에서는 일반적인 유체가 아닌 점탄성체의 폭발 시뮬레이션 방법을 제안한다. 자연 상태의 물은 수소결합의 형태로 인력을 유지하여 탄성력이 거의 존재하지 않으므로 시뮬레이션 할 때 점탄성을 갖지 않는다. SPH에서 적용되는 힘의 종류 중에서 점성력은 외력에 의한 가속도에 저항하는 힘이다. 중력외의 기타 외력으로 저항 받는 입자는 지속적으로 속도가 감소하며 일정 한계점에 도달하면 입자들 간의 인력으로 뭉친다. 하지만 젤리와 같은 점탄성체는 일반 액체와는 달리 충격을 가했을 때 원래의 형태로 되돌아가기 위한 탄소성이 존재하는데, SPH 기반의 입자 유체 시뮬레이션에서는 탄소성을 자연스럽게 표현하기 어렵다.

예를 들어 화산의 마그마는 고열로 인하여 점탄성을 갖지만 폭발시의 형태는 유체에 가까우므로 유체 시뮬레이션의 점성력으로 구현이 가능하다. 하지만 젤리 같은 물질은 특유의 탄소성으로 기존의 SPH 시뮬레이션에서 표현이 불가능했다.

SPH를 이용하여 점탄성체를 표현하는 연구가 진행 되어왔는데, Simon 등은 탄소성을 갖기 위해 물체가 한계점 이상의 외력을 받으면 변형되고, 그렇지 않으면 원래의 형태로 돌아오는 항복조건을 제안하였다[2]. 그중에서도 폰 미체스가 제안한 항

복조건을 근사[2] 하여 외력을 받은 입자의 이동거리가 한계치 이상일 때 이동한 거리만큼 위치를 변화 시켜 탄성을 표현 하였다.

입자 기반 시뮬레이션에서 물체가 받는 모든 힘을 계산해야 하는 기존의 폰 미체스 항복조건 계산식과 달리 입자가 받는 힘만큼 이동된 거리로 물체 변형의 한계 조건을 표현하였기 때문에 적은 계산 량으로 탄성을 표현 할 수 있다. 하지만 입자가 받는 거리로 힘을 표현한 항복조건은 모든 방향에서 받는 힘의 한계치로 표현되는 물체의 폭발을 표현하기 어렵다. 동일한 힘이 사방에서 가해지는 경우에도 입자 하나하나의 이동된 거리를 계산해야 하기 때문에 다량의 입자의 경우 실시간 시뮬레이션이 되지 않을 수 있다.

이 논문에서는 점탄성체를 감싸는 경계면이 점진적으로 줄어들 때 내부의 점탄성체가 외력을 견디지 못하고 폭발하는 현상을 표현하기 위해 트레스카의 항복조건을 변형한 이상적 점탄성체 항복조건을 제안하였다. 즉 입자가 이루는 점탄성체의 넓이를 계산함으로써 외력을 받아 한계 크기 이상 줄어들었을 때 물체가 폭발되도록 하였다. 트레스카의 항복조건은 연질물체의 항복조건에 있어 폰 미체스의 항복조건 보다 적용범위가 좁지만 계산식이 복잡하지 않아 트레스카의 계산식과 제안한 이상적 점탄성체 항복조건 간의 연관성도 입증할 수 있었다.

2절에서는 관련 연구들을 소개하고 3절에서는 점탄성체의 특성과, 물체가 폭발하기 까지 버티는 힘인 항복응력을 설명한다. 이후에 4절에서 트레스카의 이론에 따른 이상 탄성체 항복조건을 제안하고 5절에서 실험결과를 보인 후 6장에서 결론을 맺는다.

## 2. 관련 연구

오일러 방법은 유클리드 공간(Euclidian space)에 격자를 만들고 격자 상에서 계산된 속도 벡터

를 이용해 간접적으로 유체입자들을 이동시키는 기법이다[3]. 이 방법은 대기의 이류현상을 현실감 있게 표현할 수 있으며 정교한 유체 표현이 중시되는 어플리케이션에서 주로 사용한다. Foster 등은 나비에-스톡스 방정식을 정규화 된 격자에 적용하여 최초로 3차원 유체시뮬레이션이 가능하게 했다[4]. Stam 등은 semi-Lagrangian 기법을 이용하여 좀 더 현실감 있는 액체를 표현하였다[5]. Carlson 등은 녹아내리는 물체나 매우 끈적이는 액체를 시뮬레이션하기 위해 Eulerian solver를 개발하였으며[6], Goktekin 등은 물질의 강성률(rigidity)을 이용하여 오일러 방법으로 점탄성체를 표현하는 방법을 고안하였다[7].

오일러 방법은 유체의 이류현상을 표현하려면 연산 량이 급증하여 실시간으로 처리하기 어려우므로, 실시간 처리가 필수적인 컴퓨터 게임에는 다른 방법에 비해 연산량이 적은 라그랑제(Lagrangian) 방법을 주로 사용한다[8].

라그랑제 방법은 이류현상 등 유체주변의 환경보다 입자들 자체에 중점을 두어 시뮬레이션 함으로써 유체 입자들을 직접 모사한다. Tonnesen 등은 변형이 가능한 물체를 표현하기 위해 라그랑제 방식으로 입자를 연산하였다[9]. 라그랑제 방법 중에서도 모든 입자들의 상호 관계연산을 효율적으로 하기 위한 SPH 기법이 많이 사용된다[10]. SPH는 방사형으로 대칭인 평활 화(smoothing) 커널을 이용한다. 밀도, 압력, 점성 등 커널 안에 있는 입자들의 필드 값의 이웃한 커널과 겹치는 입자들의 필드 값의 평균치로 계산된다. 커널은 poly6와 viscosity 커널 또는 spiky[11] 커널이 주로 사용된다. 현재 SPH는 유체-고체 변형 시뮬레이션[12], 용융하는 유체를 시뮬레이션[13] 등 많은 유체 분야에서 사용되고 있다.

유체의 표현이 주목받게 되면서 점탄성 유체를 표현에 대한 학자들의 관심도 높아졌다. 특히 유체와 고체의 중간성질을 갖는 점탄성 유체가 외력을 받았을 때, 항복 조건과 응력을 이용하여 탄소성을 표현하려는 시도가 이루어졌다.

Adam 등은 포인트 기반의 점탄성체가 떨어지거나 충격을 받아 소성 변형을 일으킬 때 물질 형태의 변형에 관여하는 변형 그래디언트를 아핀 변환(affine transformation)으로 근사하여 사실적인 찌그러짐을 표현하였다[14].

또한 Simon 등은 외력을 받는 점탄성체의 현실감 있는 탄성 표현을 위한 Double Density Relaxation 기법을 제안하였다[2]. SPH의 평활화 커널을 내부와 외부로 나누고 물체의 표면을 나타내는 입자를 널의 외부입자로 정의한다. 외부입자들은 강한 결속력을 가지며 외부충격에 대한 저항이 크다. 또한 폰 미세스의 항복조건을 이용하여 점탄성체의 응력에 적용했다.

하지만 이러한 탄소성의 연구들은 반유체가 폭발하는 성질을 표현하지 못하였다. 점탄성체는 구성 성분에 따라 외력이 가해질 때 단순 소성이 아닌 물체의 형태를 쉽게 잃어버릴 수도 있다.

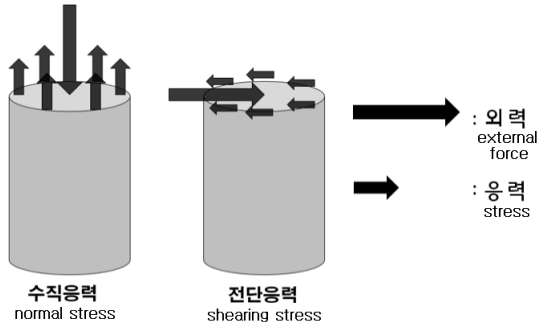
### 3. 기존 입자 기반 유체 시뮬레이션의 문제점

점탄성체 시뮬레이션에서 입자들로 구성된 물체가 사방에서 외력을 받는 경우 입자들의 밀도가 급격히 높아지고 압력이 증가한다. 강한 외력으로 인해 원래형태를 유지할 수 있는 한계를 넘어서면 물체는 형태를 유지하지 못하고 폭발한다.

응력은 물체가 외력에 의해 변형이 생겼을 때 물체 내부에서 발생하는 단위 면적당 저항력으로 유체가 외부로부터 힘(전단력, 외력)을 받으면 유체 내부에는 같은 크기의 힘(전단력, 외력)이 반대 방향으로 작용하여 유체의 원형을 유지하려는 성질이 있다.

응력은 전단응력(shearing stress)과 수직(법선)응력(normal stress)이 있다. 전단응력이란 전단력에 의해서 물체 내부의 단면에 생기는 내력을 말하며, 수직응력 어떤 단면에 대한 수직방향의 응력으로, 수직하중에 작용할 때 이에 대응하여 발생하

는 힘을 말한다. 이 논문에서는 각 면에 수직방향으로 발생하는 응력을 표현하기 위해 수직응력을 사용한다.



[Fig. 1] Comparison of shearing stress and normal stress

점탄성체 시뮬레이션은 고체와 유체의 성질을 모두 포함해야 하기 때문에 재료가 외력을 받아 소성 변형하기 위해 항복조건(yield condition)이 필요하다.

항복조건이란 외력을 받아 물체가 파괴되는 조건을 의미하는 것으로서 재료의 특성과 관련하여 규정된 것이다. 항복조건을 설명하는 가설로는 최대 전단 응력설(트레스카 설)과 최대전단 변형 에너지설(폰 미세스설)이 있다. 폰 미세스설은 변형 에너지가 어떠한 한계 값에 도달하면 항복이 일어난다고 가정한다. 일반적으로 물체 각 지점에서의 비틀림 에너지를 이용하여 물체의 강도를 해석하고 해당 물체가 파괴되는 조건을 측정한다. 그러나 실제로 각 지점에서 물체가 받는 힘을 계산해야 하며, 결과 값인 응력의 계산량이 많다.

입자 기반의 유체시뮬레이션에서 점탄성체는 기준점이 물체의 xyz축이 아닌 물체를 이루는 입자에 있다. 그러므로 힘을 받은 입자가 이동한 거리로 입자의 변형 여부를 결정한다.

$$\Delta L = \Delta t \alpha (r - L) \quad (\text{eq. 1})$$

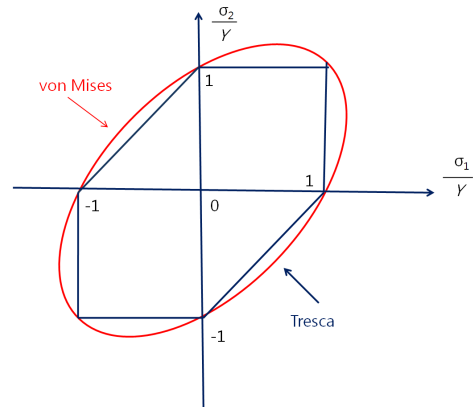
(eq. 1)은 Simon 등이 어떠한 한계 값에 도달하면 물체를 변형시킨다는 폰 미세스의 항복응력 개념을 근사한 식이다.  $L$ 은 기존 물체의 길이이며,  $a$ 는 물질 특성을 나타낸 계수이다. 변형된 시간간격  $t$ 에 변형된 물체의 길이  $r$ 과  $L$ 의 차이를  $\Delta L$ 로 정의하며,  $\Delta L$ 이 일정수치 이상이면 물체의 형태를 변형한다. 하지만 입자의 이동거리로 물체의 변화를 근사 화하는 방법으로는 여러 방향에서 적용되는 힘의 결과로 나타나는 폭발을 표현하기 어렵다.

폭발은 밀폐공간에서 물리적/화학적으로 급증된 압력의 결과로써 나타나는 현상이다. 밀폐공간에서 급증된 압력을 표현하기 위해 하나의 입자가 받는 힘이 아닌 여러 입자가 이룬 물체의 면이 받는 힘을 계산해야 한다. 적은 입자로는 기존의 이동거리 기반 근사가 효율적이지만, 다량의 입자가 사용되는 유체시뮬레이션에서 대형의 점탄성체를 시뮬레이션 하기에는 비효율적이다.

폭발은 밀폐공간에서 물리적/화학적으로 급증된 압력의 결과로써 나타나는 현상이다. 밀폐공간에서 급증된 압력을 표현하기 위해 하나의 입자가 받는 힘이 아닌 여러 입자가 이룬 물체의 면이 받는 힘을 계산해야 한다. 적은 입자로는 기존의 이동거리 기반 근사가 효율적이지만, 다량의 입자가 사용되는 유체시뮬레이션에서 대형의 점탄성체를 시뮬레이션 하기에는 비효율적이다.

#### 4. 트레스카 항복조건을 이용한 이상 점탄성체 폭발

본 논문은 물체에 발생하는 최대응력이 인장시점 항복시의 최대응력과 같을 때, 항복이 일어난다는 최대응력설의 개념인 트레스카의 항복조건을 이용한다.



[Fig. 2] Comparison the coverage of von Mises yield condition and Tresca's yield condition

트레스카의 항복조건 식은 물체 내부의 외력으로 응력이 발생한다는 뜻인 주응력과 관련이 있다. 최대주응력과 최소주응력의 차이의 1/2로 표현되며 다양한 물체의 항복조건을 표현할 수 있다[15]. 연성 물질의 조건에 따른 허용범위 수치는 폰 미세스가 안정적이지만, 계산이 복잡하기 때문에 근사한 식으로 표현한 (eq. 2)의 트레스카의 항복조건을 활용한다.

$$\tau_f = s_u = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \neq f(\sigma) \quad (\text{eq. 2})$$

항복조건은 최대주응력( $\sigma_1$ )과 최소주응력( $\sigma_3$ ) 차이의 1/2이다. 폰 미세스식을 근사한 이동거리기반 항복조건과 마찬가지로 입자가 기반이 되는 SPH 시뮬레이션은 입자로 이루어진 물체가 xyz축의 방향으로 받는 최대 주응력과 최소 주응력을 구하는 것이 불가능하다.

본 논문에서는 입자 기반 시뮬레이션의 특징인 비압축성을 이용하여 물체가 갖는 주응력을 기존 방법에서처럼 이동거리로 가정하지 않고 부피로 가정하여 항복조건을 구하는 이상 점탄성체 항복 조건을 제안한다.

비압축성은 아무리 압축해도 부피가 변하지 않는 상태이다. 기체분자는 서로 떨어져있기 때문에 압축성을 갖고 있지만, 액체분자는 서로 이상적인 인접상태로 연결되어 있기 때문에 아무리 힘을 가해도 압축되지 않는다. 실감나는 액체를 표현하기 위해 입자 기반 시뮬레이션은 비압축성을 갖게 된다. 이렇듯 물체의 움직임을 분석하는 일에 있어 비압축성은 하나의 중요한 구속조건으로 적용한다. 외력에 의해 급증된 압력이 액체의 비압축성을 방해하면, 액체는 본래의 상태로 돌아가기 위한 반작용의 힘이 축적되고, 가해지는 외력보다 클 때 폭발이 일어나게 된다.

본 논문에서는 비압축성으로 인해 일정한 부피를 유지하고 있는 이상적인 사각형의 점탄성체를 가정하고, 이것이 매우 강한 외력으로 방해받을 때 버티지 못하고 터지는 순간을 이상 점탄성체 항복

항복조건으로 정의한다. 최소 주응력을 갖는 형태를 비압축성을 유지하는 안정화 상태로 가정한다.

$$\left| \frac{V_l - V_m}{2} \right| = \tau_f = \Delta V \quad (\text{eq. 3})$$

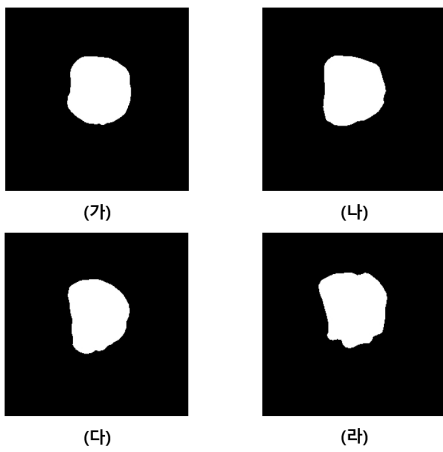
(eq. 3)은 본문에서 제안하는 이상 점탄성체 항복조건에 대한 식이다.  $V_l$ 은 최소 주응력을 갖는 물체이며  $V_m$ 은 최대 주응력을 갖는 물체의 크기이다. 최대 주응력을 갖는 물체의 크기는 무시할 수 있을 만큼 작으므로  $V_l$ 의 크기는 시뮬레이션 상 가장 작은 부피인  $1x1x1$ 로 가정한다. 결국 항복조건이 발생하여 폭발이 일어나는 형태는 최소 주응력을 갖는 크기의 절반이다.

거리기반 근사 화와 달리 동일한 힘을 물체의 다 방향 에서 받는 경우에 입자 하나의 변화량이 아닌 물체의 전체 변화량을 계산한다. 그 결과로 불필요한 연산 량이 줄어들고 주응력을 갖는 크기를 이상적인 형태로 가정하여 현실감 있는 폭발을 나타낸다.

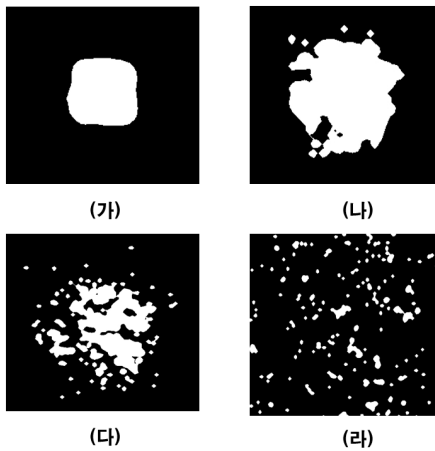
## 5. 실험 결과

실험은 Intel Core i5 3세대 3570 3.4GHz CPU 에 12GB의 주 메모리를 갖는 시스템에서 수행했다. 그래픽 카드는 2GB의 메모리를 갖는 nVidia Geforce 660Ti를 사용하였고 OpenGL 라이브러리를 사용하였다. 3D에서 이상 점탄성체 항복 조건을 실험하기 위해서 물체의 부피를 계산해야 하지만 본 실험은 좀 더 빠르고 확실한 결과를 표현하기 위해 2D 시뮬레이션 환경에서 진행하였으므로 3차원의 부피가 아닌 2차원의 면적으로 주응력의 형태를 계산한다. 헤어 젤(gel)과 같은 점질로 이루어진 물체로 실험하기 위해 점성도가 물에 비하여 약 1.6배가량의 점성도를 갖는 물체를 생성하였다. 비압축성이 유지되기 위한 최소 입자 개수인 293 개로 진행하였으며 사각형의 경계면에 모든 입자가

모인 상태를 최소 주응력, 경계면의 넓이가 최소인  $1 \times 1$ 이 되는 순간을 최대 주응력으로 가정한다. 트레스카의 항복조건을 기준으로 최대주응력과 최소주응력의 차이가  $1/2$ 이 되는 순간에 응력의~항복이 일어나 입자가 터지는 실험을 진행하였다. 기존의 거리기반 항복 조건 시뮬레이션과 비교하며 이상 점탄성체 항복 조건이 폭발 하는 순간의 형태를 측정하였다.

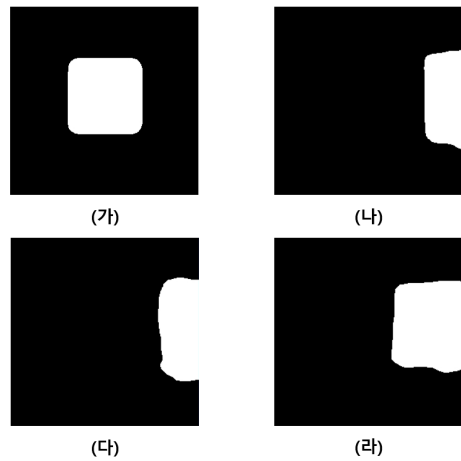


[Fig. 3] Measuring state change of Distance-based viscoelastic objects(hair gel). The pressure is applied from all sides.

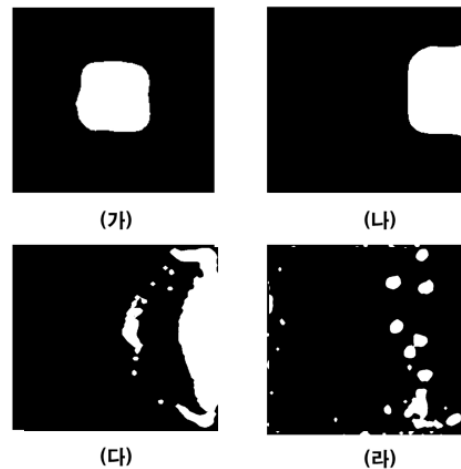


[Fig. 4] Measuring state change of Ideal viscoelastic object yield condition(hair gel). The pressure is applied from all sides.

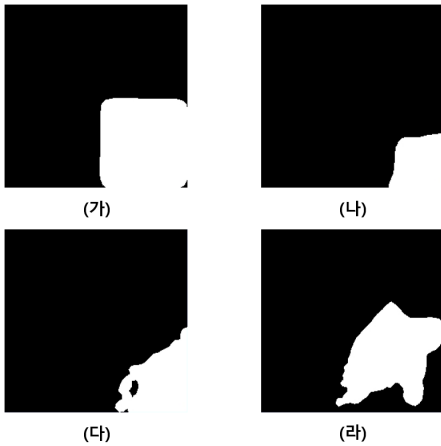
[Fig. 4]는 SPH에서 감싸는 사각형의 경계면이 점점 줄어들어 면적의  $1/2$ 까지 줄어들었을 때 한계점에서 점탄성체가 폭발하는 상황을 시뮬레이션 하였다. [Fig. 3]에의 기존 거리기반 점탄성 항복 조건과 다르게 점탄성체는 폭발이후에 근처의 입자가 덩어리를 형성하는 특징이 나타났다.



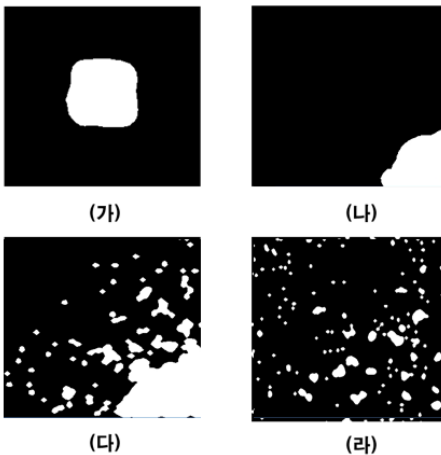
[Fig. 5] Measuring state change of Distance-based viscoelastic objects(hair gel). The pressure is applied from center to right side.



[Fig. 6] Measuring state change of Ideal viscoelastic object yield condition(hair gel). The pressure is applied from center to right side.



[Fig. 7] Measuring state change of Distance-based viscoelastic objects(hair gel), The pressure is applied from center to right diagonal.



[Fig. 8] Measuring state change of Ideal viscoelastic object yield condition(hair gel), The pressure is applied from center to right diagonal.

[Fig. 5,6,7,8]은 4방향에서 힘을 받은 [Fig. 3,4]의 경우와 다르게 오른쪽과 대각선등 다각화된 방향에서 힘을 받은 물체의 폭발 시뮬레이션이다. 기존의 거리기반 점탄성 항복 시뮬레이션은 외력이 항복 조건의 한계를 넘었을 시 형태가 소성 변형한다. 하지만 점성도가 물의 1.6배인 헤어 겔의 경우 일반 사람의 약력만 작용해도 물체가 폭발 가능하다. 본 실험에서는 단순히 위에서 아래 방향의

압력만 적용한 것이 아닌 다양한 면이나 각도에 따라 폭발실험을 진행하였으며, 형태나 흩어지는 조각의 개수가 차이나는 것을 확인할 수 있었다.

입자의 개수에 따른 프레임 율 비교는 거리 기반 근사 화 항복 조건과 이상 점탄성 체 항복 조건 둘 다 비슷한 결과를 나타내었다. 293개의 입자에서 60fps 1000개의 입자에서 57fps 5000개의 입자에서 55fps의 프레임 율을 보였다. 폭발 시 이상 점탄성 체 항복 조건에서의 프레임 율은 293개의 입자에서 6fps을 나타내었고 1000개의 입자에선 41fps, 5000개의 입자에선 17fps을 나타내었다.

## 6. 결 론

입자 기반의 점탄성체 시뮬레이션에서는 연성물질의 응력에 적합한 폰 미세스항복조건을 사용하여 물질의 소성여부를 결정하였다. 하지만 길이기반 이동거리 변화방법은 여러 방향에서 힘을 받는 점탄성체의 폭발에 적용시키기에 불가능 하였다. 이에 본 논문은 폰 미세스와는 다른 연성물질의 항복조건인 트레스카의 이론을 참조하여 점탄성체의 폭발 항복조건을 만들었다. 물체가 폭발된 이후에 근처의 입자 들이 서로 뭉쳐 또 하나의 작은 덩어리를 생성하는 현상도 확인하였다.

향후에는 고무와 같은 강한 점탄성체의 항복조건에 의해 끊어지는 순간을 현실감 있게 시뮬레이션 하기 위한 실험을 진행할 예정이다. 헤어겔(gel) 같이 유체에 가까운 물질이 아닌 고체에 가까운 점탄성체들은 강한 외력을 가하는 순간 입자가 아닌 입자와 덩어리의 혼합 형태로 끊어진다. 물질이 갖고 있는 인장 강도와 입자 기반 유체시뮬레이션에서 사용되는 항복조건을 결합하여 구현하면 더 현실감 있는 물질의 끊어짐을 표현할 수 있을 것이다.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This research was supported by Next-Generation Information Computing Development Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science, ICT & Future Planning (No. 2012M3C4A7032781).

## REFERENCES

- [1] W. T. Reeves. "Particle systems - a technique for modeling a class of fuzzy objects." *ACM Transactions on Graphics*, pp. 91-108, 1983.
- [2] S. Clavet, P. Beaudoin, and P. Poulin. "Particle-based Viscoelastic Fluid Simulation." *Eurographics/ACM SIGGRAPH*, pp. 219-228, 2005.
- [3] N. Foster, and R. Fedkiw. "Practical animation of liquids." *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. ACM, pp. 23-30, 2001.
- [4] N. Foster, and D. Metaxas. "Realistic animation of liquids." *Graphical Models and Image Processing*, pp. 471-483, 1996.
- [5] J. Stam. "Stable fluids." *SIGGRAPH*, pp. 121-128, 1999.
- [6] M. Carlson, P. J. Mucha, R. B. V. Horn, and G. TURK. "Melting and flowing." *SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, pp. 167-174, 2002.
- [7] T. G Goktekin, A. W. Bargteil, and J. F. O'Brien. "A method for animating viscoelastic fluids." *SIGGRAPH*, pp. 463-468, 2004.
- [8] C. W. Hirt, J. L. Cook, and T. D. Butler, "A Lagrangian method for calculating the dynamics of an incompressible fluid with free surface." *Journal of Computational Physics*, pp. 103-124, 1970.
- [9] D. Tonnensen. "Dynamically Coupled Particle Systems for Geometric Modeling, Reconstruction, and Animation." University of Toronto, 1998.
- [10] M. Müller, D. Charypar, and M. Gross. "Particle-based fluid simulation for interactive applications." *Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*. Eurographics Association, pp. 154-159, 2003.
- [11] M. Desbrun, and M. P. Gascuel, "Smoothed particles: A new paradigm for animating highly deformable bodies. In *Computer Animation and Simulation*." Springer Vienna, pp. 61-76, 1996.
- [12] M. Muller, S. Schirm, M. Teschner, B. Heidelberger, and M. Gross "Interaction of fluids with deformable solids." *Journal of Computer Animation and Virtual Worlds*, pp. 159-171, 2004.
- [13] M. Muller, R. Keiser, A. Nealen, M. Pauly, M. Gross, and M. Alexa "Point based animation of elastic, plastic and melting object", In *Symposium on Computer Animation*, pp. 141-151, 2004.
- [14] D. Gerszewski, H. Bhattacharya, A. W. Bargteil. "A Point-based Method for Animating Elastoplastic Solids." *Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation*, pp. 219-228, 2009.
- [15] O. Cazacu, N. Chandola, J. Alves, and B. R. Baudard. "Importance of the consideration of the specificities of local plastic deformation on the response of porous solids with Tresca matrix." *European Journal of Mechanics-A/Solids*, pp. 194-205, 2014.





성 수 경 (Sung, Su-Kyung)

2013년 3월 인하대학교 컴퓨터공학부(학사)  
2013년-현재 인하대학교 컴퓨터정보공학부(석사)

관심분야 : 유체시뮬레이션, SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)

---



김 경 수 (Kim, Gyeong-Su)

2014년 3월 인하대학교 컴퓨터공학과(학사)  
2014년-현재 인하대학교 컴퓨터정보공학부(석사)

관심분야 : 차세대컴퓨팅

---



신 병 석 (Shin, Byeong-Seok)

1990년 2월 서울대학교 컴퓨터공학과(학사)  
1992년 2월 서울대학교 컴퓨터공학과(석사)  
1997년 2월 서울대학교 컴퓨터공학과(박사)  
2000년-현재 인하대학교 컴퓨터정보공학부 교수

관심분야 : 블룸그래픽스, 차세대컴퓨팅, 실시간렌더링

---

— 이상적인 점탄성체 항복 조건을 이용한 폭발 시뮬레이션 —