



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2016년11월30일
(11) 등록번호 10-1681432
(24) 등록일자 2016년11월24일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G06T 13/20 (2011.01) F42D 3/00 (2006.01)

(52) CPC특허분류
G06T 13/20 (2013.01)
F42D 3/00 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2015-0184109

(22) 출원일자 2015년12월22일

심사청구일자 2015년12월22일

(56) 선행기술조사문헌

성수경외 2명, “이상적인 점탄성체 항복 조건을 이용한 폭발 시뮬레이션”, 한국계입학회, 14(6), DEC., 2014.*

Joseph F. Labuz et. al., “Mohr-Coulomb Failure Criterion”, Rock Mech Rock Eng(2012), 45:975-979.*

*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자

인하대학교 산학협력단

인천광역시 남구 인하로 100, 인하대학교 (용현동)

(72) 발명자

신병석

서울특별시 서초구 방배로 14, 3동 903호(방배동, 임광아파트)

김경수

충청남도 천안시 서북구 봉서8길 6, 201동 1705호(쌍용동, 일성아파트)

(74) 대리인

양정보

전체 청구항 수 : 총 5 항

심사관 : 박상철

(54) 발명의 명칭 쿨롱-모어 법칙을 이용한 강탄성 반유동체 폭발 시뮬레이션 방법

(57) 요약

일 실시예에 따른 폭발 시뮬레이션을 실행하는 방법은, 반유동체의 성질을 지닌 물체에서 입자 사이의 거리를 계산하여 초기값과 비교하는 단계; 상기 입자 사이의 거리가 초기값보다 작다면 외부로부터 힘이 가해진 것으로 판단하고, 상기 입자 사이의 응력을 계산하는 단계; 및 상기 응력을 계산함에 따른 응력 값이 쿨롱-모어 이론에 기반한 항복조건에 대한 값을 초과한다면 상기 입자 사이의 결합을 해제하는 단계를 포함하고, 상기 쿨롱-모어 이론을 기반으로 상기 물체의 특정 면에 작용하는 전단응력이 상기 물체의 전단강도에 도달함에 따라 상기 물체에 대한 파괴가 발생할 수 있다.

대표도 - 도4

```

1.  foreach particle i, j (i < j)
2.      q = distance i, j
3.      if q = default density h
4.          //there is no external force break
5.          break
6.      else
7.          computation stress g
8.          if g < gBCMe
9.              apply spring displacement
10.         else
11.             unbind
    
```

(52) CPC특허분류

G06T 2210/24 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 2015R1A2A2A01008248

부처명 미래창조과학부

연구관리전문기관 한국연구재단

연구사업명 핵심연구

연구과제명 의료용 빅데이터의 고화질 실시간 시각화 기술개발

기 여 율 1/1

주관기관 인하대학교 산학협력단

연구기간 2015.05.01 ~ 2016.04.30

공지예외적용 : 있음

명세서

청구범위

청구항 1

삭제

청구항 2

폭발 시뮬레이션을 실행하는 방법에 있어서,

반유동체의 성질을 지닌 물체에서 입자 사이의 거리를 계산하여 초기값과 비교하는 단계;

상기 입자 사이의 거리가 초기값보다 작다면 외부로부터 힘이 가해진 것으로 판단하고, 상기 입자 사이의 응력을 계산하는 단계; 및

상기 응력을 계산함에 따른 응력 값이 쿨롱-모어 이론에 기반한 항복조건에 대한 값을 초과한다면 상기 입자 사이의 결합을 해제하는 단계

를 포함하고,

상기 입자 사이의 거리가 초기값보다 작다면 외부로부터 힘이 가해진 것으로 판단하고, 상기 입자 사이의 응력을 계산하는 단계는,

파괴순간의 인장강도, 상기 파괴순간의 압축강도를 파라미터로 하여 항복강도를 극한강도로 변환하는 상기 쿨롱-모어 이론에 기반한 식을 제안하고,

상기 폭발 시뮬레이션 실행 방법은,

상기 쿨롱-모어 이론을 기반으로 상기 물체의 특정 면에 작용하는 전단응력이 상기 물체의 전단강도에 도달함에 따라 상기 물체에 대한 파괴가 발생하는

것을 특징으로 하는 폭발 시뮬레이션 실행 방법.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 쿨롱-모어 이론에서 전단응력은, 상기 물체의 특정면의 수직응력의 함수로 표현되고,

상기 항복강도는, 상기 반유동체의 성질을 지닌 물체가 항복 상태에 이르렀을 때의 강도를 포함하고,

상기 극한강도는, 상기 물체가 외력에 의해 파괴될 때까지 견딜 수 있는 최대 단위 응력인

것을 특징으로 하는 폭발 시뮬레이션 실행 방법.

청구항 4

폭발 시뮬레이션을 실행하는 방법에 있어서,

반유동체의 성질을 지닌 물체에서 입자 사이의 거리를 계산하여 초기값과 비교하는 단계;

상기 입자 사이의 거리가 초기값보다 작다면 외부로부터 힘이 가해진 것으로 판단하고, 상기 입자 사이의 응력을 계산하는 단계; 및

상기 응력을 계산함에 따른 응력 값이 쿨롱-모어 이론에 기반한 항복조건에 대한 값을 초과한다면 상기 입자 사이의 결합을 해제하는 단계

를 포함하고,

상기 폭발 시뮬레이션 실행 방법은,

상기 쿨롱-모어 이론을 기반으로 상기 물체의 특정 면에 작용하는 전단응력이 상기 물체의 전단강도에 도달함에

따라 상기 물체에 대한 파괴가 발생하고, 일정한 부피를 가지고 탄성이 기설정된 기준 이상인 반유동체의 성질을 지닌 물체가 기설정된 높이 이상의 위치에서 낙하됨에 따라 상기 물체에 상기 항복조건을 초과하는 응력이 작용하는

것을 특징으로 하는 폭발 시뮬레이션 실행 방법.

청구항 5

폭발 시뮬레이션을 실행하는 방법에 있어서,

반유동체의 성질을 지닌 물체에서 입자 사이의 거리를 계산하여 초기값과 비교하는 단계;

상기 입자 사이의 거리가 초기값보다 작다면 외부로부터 힘이 가해진 것으로 판단하고, 상기 입자 사이의 응력을 계산하는 단계; 및

상기 응력을 계산함에 따른 응력 값이 쿨롱-모어 이론에 기반한 항복조건에 대한 값을 초과한다면 상기 입자 사이의 결합을 해제하는 단계

를 포함하고,

상기 응력을 계산함에 따른 응력 값이 상기 쿨롱-모어 이론에 기반한 항복조건에 대한 값을 초과한다면 상기 입자 사이의 결합을 해제하는 단계는,

상기 물체가 충격을 받은 부분에서의 힘을 상기 입자 사이의 거리로 표현하여, 상기 물체가 한계 이상의 힘을 받을 경우에 영구변형 대신 상기 입자 사이의 결합을 각각 계산하여 결합을 제거하고,

상기 폭발 시뮬레이션 실행 방법은,

상기 쿨롱-모어 이론을 기반으로 상기 물체의 특정 면에 작용하는 전단응력이 상기 물체의 전단강도에 도달함에 따라 상기 물체에 대한 파괴가 발생하는

것을 특징으로 하는 폭발 시뮬레이션 실행 방법.

청구항 6

폭발 시뮬레이션을 실행하는 시스템에 있어서,

반유동체의 성질을 지닌 물체에서 입자 사이의 거리를 계산하여 초기값과 비교하는 비교부;

상기 입자 사이의 거리가 초기값보다 작다면 외부로부터 힘이 가해진 것으로 판단하고, 상기 입자 사이의 응력을 계산하는 계산부; 및

상기 응력을 계산함에 따른 응력 값이 쿨롱-모어 이론에 기반한 항복조건에 대한 값을 초과한다면 상기 입자 사이의 결합을 해제하는 해제부

를 포함하고,

상기 해제부는,

상기 물체가 충격을 받은 부분에서의 힘을 상기 입자 사이의 거리로 표현하여, 상기 물체가 한계 이상의 힘을 받을 경우에 영구변형 대신 상기 입자 사이의 결합을 각각 계산하여 결합을 제거하고,

상기 폭발 시뮬레이션 실행 시스템은,

상기 쿨롱-모어 이론을 기반으로 상기 물체의 특정 면에 작용하는 전단응력이 상기 물체의 전단강도에 도달함에 따라 상기 물체에 대한 파괴가 발생하는

것을 특징으로 하는 폭발 시뮬레이션 실행 시스템.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 아래의 설명은 쿨롱-모어 법칙을 이용한 강탄성 반유동체 폭발 시뮬레이션 기술에 관한 것이다.

배경 기술

[0002]최근 영화와 게임에 대한 사용자들의 기대치가 높아짐에 따라 현실감 있는 3D 영상 표현에 대한 관심이 증가하고 있다. 예를 들면, 3D 영상 표현은, 바람에 흩날리는 머리카락이나 잔잔하게 흐르는 물 등 다각형 기반 모델로 처리하기 어려운 대상의 세부적인 움직임 표현이 중요하다. 이를 위해서는 유체 시뮬레이션을 통해 유체의 움직임을 현실감 있게 표현해야 한다.

[0003]유체 시뮬레이션 방법은 크게 격자 구조를 이용한 오일러(Eulerian) 방법과 입자를 이용한 라그랑제(Lagrangian) 방법이 있다. 오일러 방법은 유클리드 공간에 격자를 생성하고, 각 격자마다 계산된 속도 벡터를 이용해 입자의 흐름을 표현하고 제어하는 방법이다. 이 방법은 단순한 유체의 움직임에서부터 복잡한 점탄성체까지 현실적인 유체의 흐름을 표현할 수 있다. 하지만 질량 보존을 보장하지 않고, 상당한 연산량을 필요로 하기 때문에 실시간 처리가 어렵다는 문제가 있다. 한편, 라그랑제 방법은 기준시간을 설정하여 그 시간마다 입자의 위치를 계산하여 유체를 직접 추적하는 방법이다. 부드러운 유체 시뮬레이션을 하기 위해서는 다수의 입자로 시뮬레이션 해야 한다는 단점이 있지만 질량 보존을 보장함과 동시에 간단한 연산으로 유체의 움직임을 표현할 수 있다.

[0004]게임과 같은 실시간 어플리케이션에서는 실시간성이 가장 중요하므로 입자의 움직임을 직접 추적하는 라그랑제 방법이 주로 사용된다. 대표적인 라그랑제 방법인 SPH(smoothed particle hydrodynamics) 기법은 천체 물리학 분야에서 발전된 것으로 나비에-스톡스(Navier-Stokes) 방정식을 이용한 입자 시스템에서 보편적으로 사용되는 보간 방법이다.

[0005]물과 같은 성질을 가지는 일반적인 액체 시뮬레이션이 아닌 탄성이 강한 반유동체의 움직임을 시뮬레이션 하는 방법을 제시하기로 한다. 녹는점과 끓는점이 극단적으로 높거나 낮지 않은 일반적인 유체의 경우는 분자 사이의 결합이 강하지 않기 때문에 점탄성이 거의 존재하지 않는다. 하지만 젤리와 같은 반유동체의 경우 일반적인 액체와는 달리 충격을 가했을 때 원래의 형태로 되돌아가기 위한 탄성이 존재한다. 하지만 SPH 기반의 유체 시뮬레이션은 이러한 탄성을 자연스럽게 표현하기 어렵다.

[0006]SPH를 이용하여 점탄성체의 반응을 시뮬레이션 하는 연구가 다양하게 진행되어 왔다. Simon 등은 물체가 일정 크기 이상의 힘을 받으면 변형되고, 그렇지 않으면 원래의 형태로 돌아오는 탄성에 대한 항복조건을 제안하였다. 항복조건은 크게 연성재료에 대한 항복과 취성재료에 대한 파괴, 두 가지가 있다. Simon의 논문은 연성재료가 항복조건 이상의 힘을 받으면 물체가 소성 변형하여 원래의 형태로 돌아오지 않는다는 폰 미세스의 항복이론을 적용하였다. 폰 미세스의 항복이론은 물체가 받는 힘을 계산해서 항복조건 이하의 받으면 탄성이 작용하지만, 그 이상의 힘을 받으면 입자 전체가 결합력을 잃고 폭발한다는 것이다.

[0007]하지만 실리콘과 같이 탄성이 매우 강한 반유동체는 항복조건 이상의 큰 충격을 받아 변형이 일어날 때 일반적인 점탄성체의 소성변형 공식만으로는 자연스러운 표현이 어렵다. 고탄성 반유동체가 폭발할 때는 원래의 형태를 완전히 잃는 소성 변형이 일어나지 않고 충격이 가해진 부분에서 집중적으로 파괴가 일어나고 힘이 덜 가해진 부분은 원래의 형태를 유지하는 성질 때문이다.

[0008]이러한 문제점을 해결하기 위해 탄성이 강한 반유동체에 강한 충격을 가했을 때 외력을 견디지 못하고 쪼개짐이 일어나는 현상을 표현하기 위해 쿨롱-모어 파손 이론을 적용한 기술이 요구되고 있다. 다시 말해서, 한계치 이상의 충격을 받았을 때 소성 변형을 일으키는 대신 한계치를 넘은 외력을 받은 지점에서부터 균열이 일어나도록 하는 기술을 제안하기로 한다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0009]일 실시예에 따른 폭발 시뮬레이션 실행 시스템은 힘이 가해짐에 따라 물체에 발생하는 최대응력이 물체의 파단 응력에 도달하였을 경우, 항복이 일어난다는 취성 변형에 적합한 쿨롱-모어 이론을 제안한다.

과제의 해결 수단

- [0010] 일 실시예에 따른 폭발 시뮬레이션을 실행하는 방법은, 반유동체의 성질을 지닌 물체에서 입자 사이의 거리를 계산하여 초기값과 비교하는 단계; 상기 입자 사이의 거리가 초기값보다 작다면 외부로부터 힘이 가해진 것으로 판단하고, 상기 입자 사이의 응력을 계산하는 단계; 및 상기 응력을 계산함에 따른 응력 값이 쿨롱-모어 이론에 기반한 항복조건에 대한 값을 초과한다면 상기 입자 사이의 결합을 해제하는 단계를 포함하고, 상기 쿨롱-모어 이론을 기반으로 상기 물체의 특정 면에 작용하는 전단응력이 상기 물체의 전단강도에 도달함에 따라 상기 물체에 대한 파괴가 발생할 수 있다.
- [0011] 일측에 따르면, 상기 입자 사이의 거리가 초기값보다 작다면 외부로부터 힘이 가해진 것으로 판단하고, 상기 입자 사이의 응력을 계산하는 단계는, 파괴순간의 인장강도, 상기 파괴순간의 압축강도를 파라미터로 하여 항복강도를 극한강도로 변환하는 상기 쿨롱-모어 이론에 기반한 식을 제안할 수 있다.
- [0012] 또 다른 일측에 따르면, 상기 쿨롱-모어 이론에서 전단응력은, 상기 물체의 특정면의 수직응력의 함수로 표현되고, 상기 항복강도는, 상기 반유동체의 성질을 지닌 물체가 항복 상태에 이르렀을 때의 강도를 포함하고, 상기 극한강도는, 상기 물체가 외력에 의해 파괴될 때까지 견딜 수 있는 최대 단위 응력일 수 있다.
- [0013] 또 다른 일측에 따르면, 상기 폭발 시뮬레이션 실행 방법은, 일정한 부피를 가지고 탄성이 기설정된 기준 이상인 반유동체의 성질을 지닌 물체가 기설정된 높이 이상의 위치에서 낙하됨에 따라 상기 물체에 상기 항복조건을 초과하는 응력이 작용할 수 있다.
- [0014] 또 다른 일측에 따르면, 상기 응력을 계산함에 따른 응력 값이 상기 쿨롱-모어 이론에 기반한 항복조건에 대한 값을 초과한다면 상기 입자 사이의 결합을 해제하는 단계는, 상기 물체가 충격을 받은 부분에서의 힘을 상기 입자 사이의 거리로 표현하여, 상기 물체가 한계 이상의 힘을 받을 경우에 영구변형 대신 상기 입자 사이의 결합을 각각 계산하여 결합을 제거할 수 있다.
- [0015] 일 실시예에 따르면, 폭발 시뮬레이션을 실행하는 시스템은, 반유동체의 성질을 지닌 물체에서 입자 사이의 거리를 계산하여 초기값과 비교하는 비교부; 상기 입자 사이의 거리가 초기값보다 작다면 외부로부터 힘이 가해진 것으로 판단하고, 상기 입자 사이의 응력을 계산하는 계산부; 및 상기 응력을 계산함에 따른 응력 값이 쿨롱-모어 이론에 기반한 항복조건에 대한 값을 초과한다면 상기 입자 사이의 결합을 해제하는 해제부를 포함하고, 상기 쿨롱-모어 이론을 기반으로 상기 물체의 특정 면에 작용하는 전단응력이 상기 물체의 전단강도에 도달함에 따라 상기 물체에 대한 파괴가 발생할 수 있다.

발명의 효과

- [0016] 일 실시예에 따른 폭발 시뮬레이션 실행 시스템은 강한 탄성을 가진 반유동체가 수직 낙하를 통해 지면에 부딪혀 힘을받은 경계면이 파단응력에 도달하였을 때 쿨롱-모어 이론을 적용하여 물체가 파괴되는 과정을 현실감 있게 표현할 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0017] 도 1은 일 실시예에 따른 응력을 설명하기 위한 도면이다.
- 도 2 및 도 3은 일 실시예에 따른 쿨롱-모어 이론을 설명하기 위한 도면이다.
- 도 4는 일 실시예에 따른 폭발 시뮬레이션 실행 시스템에서 탄성 변화 시뮬레이션의 pseudo code를 나타낸 것이다.
- 도 5는 일 실시예에 따른 폭발 시뮬레이션 실행 시스템의 구성을 설명하기 위한 블록도이다.
- 도 6은 일 실시예에 따른 폭발 시뮬레이션 실행 시스템의 폭발 시뮬레이션 실행 방법을 설명하기 위한 흐름도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0018] 이하, 실시예를 첨부한 도면을 참조하여 상세히 설명한다.
- [0019] 아래의 실시예에서는 일정한 부피를 가지고 탄성이 강한 반유동체가 높은 위치에서 떨어질 때 항복조건을 넘어선 응력이 작용하면 물체가 파괴된다는 점탄성체의 파괴 조건을 제안한다. 비압축성으로 인해 일정한 부피를 유지하고 있는 육면체의 탄성체가 강한 외력으로 변형을 일으키는 순간을 탄성체의 변형으로 정의하기로 한다.
- [0020] 물체가 받은 힘을 변형된 길이나 부피로 표현한 기존의 입자 기반 시뮬레이션과 달리, 힘을 받았을 때 물체에 발생하는 최대응력이 물체의 파단응력에 도달하였을 때 항복이 일어난다는 취성 변형에 적합한 쿨롱-모어 이론을 제안하기로 한다. 강한 탄성을 가진 반유동체가 수직 낙하를 통해 지면에 부딪혀 힘을 받은 경계면이 파단 응력에 도달하였을 때 쿨롱-모어 이론을 적용하여 물체가 현실감 있게 파괴됨을 설명하기로 한다.
- [0021] SPH는 천체 물리학 문제를 해결하기 위해 Lucy가 제안하고 Gingold와 Monaghan이 개발한 시뮬레이션 방식이다. 입자들은 각각 질량, 밀도, 속도 등과 같은 다양한 필드 속성을 가지고 있고 이들은 시뮬레이션을 하는 동안 독립적으로 움직인다.
- [0022] Reeves는 컴퓨터 그래픽스에 최초로 입자 시스템을 도입했다. 이들은 불이나 폭포 등 다양한 유체의 효과를 빠르게 구현하는 방법을 제시하였다. Miller와 Pearce는 이러한 입자간의 상호작용을 분자 역학을 이용하여 더욱 자세하게 설명하였다. 이를 통해 고체가 녹는 시뮬레이션 등을 더욱 자연스럽게 구현할 수 있었다.
- [0023] Desbrun와 Gascuel은 변형이 심한 물체를 시뮬레이션하기 위해 처음으로 SPH 개념을 적용하였다. Müller는 처음으로 액체 시뮬레이션에 SPH를 적용하였다. 이들은 Morris가 제시한 표면장력 아이디어를 기반으로 액체의 움직임을 시뮬레이션 하였다. 하지만 표면의 정교한 곡률까지 계산하지는 못하였다. Premoze 등은 입자를 바탕으로 하는 라그랑제 방법을 이용하여 보다 정교하고 실감 있게 유체를 표현하였다. 그들은 표준 SPH보다 비압축성이 높은 MPS(Moving-Particle Semi-Implicit) 방법을 이용하여 나비에-스톡스 방정식을 해결하였다. Müller 등은 탄성이 높은 물질에서부터 소성이 높은 물체에 이르기까지 다양한 물질의 특성을 시뮬레이션 하기 위한 입자 기반 방법을 제안 하였다. 이들은 액체를 직접 시뮬레이션 하지는 않았지만, 비슷한 유형의 물체들에 대해 매우 사실적인 결과를 나타내었다.
- [0024] 유체의 사실적인 움직임이 주목받기 시작하면서 점탄성 유체를 표현하는 것에 대한 관심도 높아졌다. Steele 등은 점성 액체를 시뮬레이션 하는 입자 기반 방법을 제시하였다. 이들은 입자 사이의 거리를 기반으로 물체의 점성을 정의하였다. 부피를 보존하는 반복 완화 기법(Iterative Relaxation Scheme)은 선형 밀도 커널을 이용하여 점성을 표현할 수 있지만, 높은 점성을 가진 유체에는 적용이 되지 않는다는 단점이 있다. Simon 등은 외력을 받는 점탄성체의 현실감 있는 탄성 표현을 위한 이중 밀도 기법(Double Density Relaxation)과 폰 미세스의 항복조건을 이용하여 점탄성체의 응력을 구현하였다. 하지만 이러한 탄소성의 연구들은 점탄성체의 폭발하는 성질을 표현하지 못하였다. Sung 등은 최대 전단응력 이론을 적용하여 연성물질에 대한 폭발을 구현하였다. 하지만 헤어 겔과 같이 점탄성이 약한 물질에 한정적이기 때문에 탄성이 강한 반유동체가 폭발할 때의 움직임을 표현하지 못한다.
- [0025] 도 1은 일 실시예에 따른 응력을 설명하기 위한 도면이다.
- [0026] 일반적으로 유체는 변형이 쉬우며, 닫는 그릇의 형태에 의존하지 않는 자유표면을 가진 물질을 의미한다. 탄성체는 외부 힘에 의하여 변형이 되었다가 힘이 제거 되었을 때 원래의 모양으로 되돌아가려는 성질을 지닌 물체를 의미한다. 유체는 형상 변화에 따른 탄성이 거의 없기 때문에 일반적인 유체 시뮬레이션에서는 탄성을 고려하지 않는다. 하지만 콜로이드 겔이나 고분자 용액과 같이 액체 성분을 다량 함유하고 있음에도 불구하고 형상을 유지하는 능력을 가진 반유동체를 시뮬레이션 하는 경우에는 탄성표현이 매우 중요하다.
- [0027] 탄성 표현시 고려해야 할 대표적인 요소는 응력(Stress)과 탄성계수(Modulus Of Elasticity)이다. 응력에는 인장 응력(Tensile Stress)과 압축 응력(Compressive Stress), 전단 응력(Shearing Stress)이 포함될 수 있다. 인장 응력과 압축 응력은 어떤 단면에 대한 수직방향으로 작용하는 힘으로서, 수직하중이 작용할 때 이에 대응하여 발생하는 힘을 의미한다. 전단 응력이란 전단력에 의해서 물체 내부의 단면에 생기는 내력을 말한다. 본

발명에서는 수직으로 발생하는 응력을 표현하기 때문에 인장 응력과 압축 응력을 사용하기로 한다.

[0028] 도 2는 일 실시예에 따른 모어 원을 나타낸 도면이다.

[0029] 탄성계수란 탄성물질이 응력을 받았을 때 일어나는 변형되는 정도를 나타낸 것이다. 탄성계수는 하중에 대한 재료의 반응을 계산할 수 있도록 한다. 탄성계수 E 의 단위는 파스칼이며, F 는 재료에 작용하는 하중, A_0 는 재료의 단면적, Δl 는 재료의 길이 변화량, l_0 은 재료의 원래 길이일 때 수학식 1과 같은 식을 얻을 수 있다.

[0030] 수학식 1:

[0031]

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F/A_0}{\Delta l/l_0} = \frac{Fl_0}{A_0\Delta l}$$

[0032] 탄성체의 움직임을 표현하는 것과 더불어 큰 외력을 가했을 때 변형되는 움직임에 대한 표현 역시 중요하다. 물체에 힘을 가하면 변형되는데 고무줄 같이 힘을 제거한 후에 원형으로 복귀하는 것을 탄성변형(Elastic Deformation)이라 하고, 찰흙과 같이 영구 변형되는 것을 소성변형(Plastic Deformation)이라 한다. 또한 일정 크기 이상의 외력을 받을 경우 물체가 변형을 거의 일으키지 않고 파괴되는 물체들을 취성재료(Brittle Material), 물체가 일정 크기 이상의 힘을 받을 경우 영구변형이 지속되는 물체들을 연성재료(Ductile Material)라 한다.

[0033] 대부분의 물질은 탄성과 소성을 모두 가지며, 어느 성질이 더 우세한가는 물질의 종류, 외부 힘의 크기 그리고 변형하는 형태에 좌우될 수 있다. 예를 들면, 고무줄은 쉽게 늘어났다가 원래의 형상으로 돌아오지만 강한 외력을 받았을 때 바로 끊어지거나 영구적으로 변형되어 원래의 형상으로 돌아오지 않는다. 고무줄이 쉽게 늘어났다가 원래의 형상으로 돌아오는 것을 탄성이 우세하다고 하며, 고무줄이 강한 외력을 받았을 경우 바로 끊어지거나 영구적으로 변형이 되어 원래의 형상으로 돌아오지 않는 것을 소성이 우세하다고 한다. 하지만 탄성과 소성을 모두 가지고 있는 일반적인 물체를 제외하고 탄성이 매우 강한 물체를 취성재료라 부르며 소성이 매우 강한 물체를 연성재료라 분류한다. 취성재료는 소성변형이 거의 없이 곧바로 파괴되는 물질을 말하고, 연성재료는 외력이 가해진 방향으로 소성변형을 지속하는 물질을 말한다.

[0034] 보편적으로 물체가 일정 크기 이상의 외력을 받으면 변형 하게 되는데, 이러한 변형을 하게 되는 기준점을 항복 조건(Yield Condition)이라고 한다. 대표적인 항복조건에 대한 가설로는 연성재료에 적합한 최대 변형에너지 이론(Maximum Distortion Energy Theory)과 최대 전단응력 이론(Maximum Shear Stress Theory)이 있고, 취성재료의 파괴에 적합한 최대 주응력 이론(Maximum Principal Stress Theory)과 쿨롱-모어이론(Coulomb-Mohr theory)이 있다.

[0035] 최대 변형에너지 이론은 물체의 변형에너지가 항복이 발생할 때의 변형에너지와 같거나 클 때 항복이 일어난다고 예측하는 이론이다. σ_z 는 최대응력, σ 는 주응력, τ 는 전단응력일 때 수학식 2와 같은 최대 변형에너지(Distortion Energy)에 대한 항복조건 식을 얻을 수 있다.

[0036] 수학식 2:

[0037]

$$g_e^{DE} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]^{1/2} \geq 1$$

[0038] 최대 전단응력 이론은 물체가 받는 전단응력이 물체가 가진 항복조건의 전단응력과 동일하거나 이를 초과할 때 항복이 시작된다고 판단하는 이론이다. σ_1 을 최대주응력, σ_3 을 최소주응력, S_y 를 항복강도라 할 때 최대 전단응력(Maximum Shear Stress)에 대한 항복조건 식은 수학식 3과 같다.

[0039] 수학식 3:

$$g_e^{MSS} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{S_y} \geq 1$$

[0040]

[0041] 최대 주응력 이론은 물체 내에 발생하는 최대응력이 재료의 파괴와 관련된 특정 수치에 도달하면 파괴가 일어난다는 이론이다. 쿨롱-모어이론은 인장 및 압축 실험을 통해 도 2와 같이 모어 원(Mohr circle)(210)을 그리고, 모어 원(210)에 공통접선을 그어 이 접선을 파손 한계선(220)으로 이용하는 방법이다. 모어 원(210)이란 방향과 크기를 가지는 힘의 단위 면적당 크기를 나타낸 도식이다.

[0042] 폭발 시뮬레이션 실행 시스템은 일정한 부피를 가지고 탄성이 강한 반유동체가 높은 위치에서 떨어질 때 항복조건을 넘어서 응력이 작용하면 물체가 파괴된다는 점탄성체의 파괴 조건을 제안한다. 비압축성으로 인해 일정한 부피를 유지하고 있는 육면체의 탄성체가 강한 외력으로 변형을 일으키는 순간을 탄성체의 변형으로 정의할 수 있다.

[0043] 헤어 젤이나 밀가루 반죽 같이 탄성보다 소성이 강한 물체들에 연성재료에 적합한 최대 변형에너지 이론과 최대 전단응력 이론에서 제시한 항복조건을 적용하면, 물체가 원래 형상으로 돌아오지 못하고 영구변형이 진행되다가 일정 수치 이상의 변형이 일어나거나 사방으로 터지는 소성체의 특성을 사실적으로 표현할 수 있다. 하지만 실리콘이나 고무같이 소성보다 탄성이 강한 물체들을 표현할 때 위의 이론을 이용하면, 영구변형이 진행되지 않고 탄성변형 이후 바로 폭발되는 탄성체 폭발을 자연스럽게 시뮬레이션 하지 못한다. 이때, 취성 변형에 적합한 쿨롱-모어 이론을 적용할 수 있다.

[0044] 도 3을 참고하면, 쿨롱-모어의 이론은 물체의 특정 면에 작용하는 전단응력이 물체의 전단강도에 도달하였을 때 파괴가 일어나며, 이 전단응력은 그 면상의 수직응력의 함수로 표현된다는 이론이다. 항복강도란 재료가 항복 상태에 이르렀을 때의 강도이며, 극한강도는 물체가 외력에 의해 파괴될 때까지 견딜 수 있는 최대 단위 응력을 의미할 수 있다. 쿨롱-모어에 대한 항복조건 식은 항복강도를 극한강도로 바뀌어 표현하므로 파괴이론에 대한 식은 다음과 같이 표현될 수 있다. S_{ut} 는 파괴순간의 인장강도, S_{uc} 는 파괴순간의 압축강도일 때 취성 쿨롱-모어(Brittle Coulomb-Mohr)에 대한 항복조건 식(수학식 4)를 활용할 수 있다.

[0045] 수학식 4:

$$g_e^{BCM} = \frac{\sigma_1}{S_{ut}} - \frac{\sigma_3}{S_{uc}} \geq 1$$

[0046]

[0047] 일 실시예에 따른 폭발 시뮬레이션 실행 시스템은 탄성이 강한 반유동체에 강한 충격을 가했을 때 외력을 견디지 못하고 쪼개짐이 일어나는 현상을 표현하기 위해 쿨롱-모어 파손 이론을 적용하여, 한계치 이상의 충격을 받았을 때 소성 변형을 일으키는 대신 한계치를 넘는 외력을 받은 지점에서부터 균열이 일어나도록 제공할 수 있다.

[0048] 본 발명에서는 강한 탄성을 가진 반유동체가 외부로부터 강한 충격을 받을 때 탄성의 변화에 대한 물체의 형상 변환 알고리즘을 제안한다. 도 4는 일 실시예에 따른 폭발 시뮬레이션 실행 시스템에서 탄성 변화 시뮬레이션의 pseudo code를 나타낸 것이다.

[0049] 도 5는 일 실시예에 따른 폭발 시뮬레이션 실행 시스템의 구성을 설명하기 위한 블록도이고, 도 6은 일 실시예에 따른 폭발 시뮬레이션 실행 시스템의 폭발 시뮬레이션 실행 방법을 설명하기 위한 흐름도이다. 폭발 시뮬레이션 실행 방법은 폭발 시뮬레이션 실행 시스템에 의하여 수행될 수 있다.

[0050] 단계(610)에서 계산부(510)는 반유동체의 성질을 지닌 물체에서 입자 사이의 거리를 계산하여 초기값을 비교할 수 있다. 예를 들면, 입자 i 와 j 간의 거리를 계산하여 초기값과 비교할 수 있다. 이때, 초기값은 실험의 대상이 될 물체의 밀도 값으로 사용자가 설정한 값이다.

[0051] 단계(610)에서 계산부(520)는 입자 사이의 거리가 초기값보다 작다면 외부로부터 힘이 가해진 것으로 판단하고,

입자 사이의 응력을 계산할 수 있다. 만약, 입자 간 거리가 초기값보다 작다면 외부로부터 힘을 받은 것이므로 수학적 4를 사용하여 응력을 계산할 수 있다.

[0052] 단계(630)에서 해제부(530)는 응력을 계산함에 따른 응력 값이 쿨롱-모어 이론에 기반한 항복조건에 대한 값을 초과한다면 입자 사이의 결합을 해제할 수 있다. 예를 들면, 계산한 응력 값이 파괴조건보다 크다면 입자 i 와 j 사이의 결합을 해제할 수 있다.

[0053] 일 실시예에 따른 폭발 시뮬레이션 실행 시스템은 물체의 소성변형만을 고려한 이전의 시뮬레이션과 달리 물체가 충격을 받은 부분에서의 힘을 입자 사이의 거리로 표현할 수 있다. 그 결과 물체가 한계 이상의 힘을 받았을 때 영구변형대신 입자간의 결합을 각각 계산하여 결합을 제거하므로 실제 물질이 충격을 받았을 때의 모습을 현실감 있게 나타낼 수 있다.

[0054] 폭발 시뮬레이션 실행 시스템은 예를 들면, Intel Core i5 3세대 4670 3.4GHz CPU에 8GB의 주 메모리를 갖는 시스템에서 수행할 수 있다. 그래픽카드는 4GB의 메모리를 갖는 nVidia Geforce 760을 사용하였고 Blender와 Python script를 이용해서 구현될 수 있다. 폭발 시뮬레이션 실행 시스템은 강한 탄성을 가진 반유동체를 표현하기 위해 탄성도가 물의 80배 정도 되는 점질로 이루어진 물체를 정의하여 사용할 수 있다.

[0055] 폭발 시뮬레이션 실행 시스템은 3D에서 탄성이 강한 반유동체의 폭발을 시험하기 위해 수직 낙하실험을 통해 물체에 충격을 주고 그 결과를 확인할 수 있다. 비압축성을 잘 나타내기 위해 대상 물체는 정육면체 형태로 만들었으며 가로, 세로, 높이 각각 20개씩 총 8000개의 입자로 구성될 수 있다. 또한 육면체의 경계면에 모든 입자가 모인 상태를 최소 주응력, 항복조건에 다다르기 바로 직전의 순간을 최대 주응력으로 가정하기로 한다. 항복조건을 적용하지 않은 일반적인 탄성체를 측정하고 제안하는 방법을 적용하여 시뮬레이션 결과도 측정하여 비교할 수 있다.

[0056] 기존의 입자 기반의 점탄성체 시뮬레이션에서는 연성물질의 변형에 적합한 최대 변형에너지 이론과 최대 전단응력 이론을 이용하여 물질의 소성여부를 결정하였다. 하지만 소성변형 단계를 거의 거치지 않는 탄성이 강한 반유동체의 경우엔 이러한 소성변형의 항복조건은 자연스럽게 못한 결과를 나타내었다. 일 실시예에 따르면, 탄성을 가진 반유동체 시뮬레이션에서는 기존의 연성물질을 응력에 적합한 최대 변형에너지이론, 최대 전단응력 이론 대신에 취성물질에 적합한 쿨롱-모어의 항복조건을 사용하는 것이 보다 사실적인 결과를 나타낼 수 있다.

[0057] 이상에서 설명된 장치는 하드웨어 구성요소, 소프트웨어 구성요소, 및/또는 하드웨어 구성요소 및 소프트웨어 구성요소의 조합으로 구현될 수 있다. 예를 들어, 실시예들에서 설명된 장치 및 구성요소는, 예를 들어, 프로세서, 콘트롤러, ALU(arithmetic logic unit), 디지털 신호 프로세서(digital signal processor), 마이크로컴퓨터, FPGA(field programmable gate array), PLU(programmable logic unit), 마이크로프로세서, 또는 명령(instruction)을 실행하고 응답할 수 있는 다른 어떠한 장치와 같이, 하나 이상의 범용 컴퓨터 또는 특수 목적 컴퓨터를 이용하여 구현될 수 있다. 처리 장치는 운영 체제(OS) 및 상기 운영 체제 상에서 수행되는 하나 이상의 소프트웨어 애플리케이션을 수행할 수 있다. 또한, 처리 장치는 소프트웨어의 실행에 응답하여, 데이터를 접근, 저장, 조작, 처리 및 생성할 수도 있다. 이해의 편의를 위하여, 처리 장치는 하나가 사용되는 것으로 설명된 경우도 있지만, 해당 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자는, 처리 장치가 복수 개의 처리 요소(processing element) 및/또는 복수 유형의 처리 요소를 포함할 수 있음을 알 수 있다. 예를 들어, 처리 장치는 복수 개의 프로세서 또는 하나의 프로세서 및 하나의 콘트롤러를 포함할 수 있다. 또한, 병렬 프로세서(parallel processor)와 같은, 다른 처리 구성(processing configuration)도 가능하다.

[0058] 소프트웨어는 컴퓨터 프로그램(computer program), 코드(code), 명령(instruction), 또는 이들 중 하나 이상의 조합을 포함할 수 있으며, 원하는 대로 동작하도록 처리 장치를 구성하거나 독립적으로 또는 결합적으로(collectively) 처리 장치를 명령할 수 있다. 소프트웨어 및/또는 데이터는, 처리 장치에 의하여 해석되거나 처리 장치에 명령 또는 데이터를 제공하기 위하여, 어떤 유형의 기계, 구성요소(component), 물리적 장치, 가상장치(virtual equipment), 컴퓨터 저장 매체 또는 장치, 또는 전송되는 신호 파(signal wave)에 영구적으로, 또는 일시적으로 구체화(embodiment)될 수 있다. 소프트웨어는 네트워크로 연결된 컴퓨터 시스템 상에 분산되어서, 분산된 방법으로 저장되거나 실행될 수도 있다. 소프트웨어 및 데이터는 하나 이상의 컴퓨터 판독 가능 기록 매체에 저장될 수 있다.

[0059] 실시예에 따른 방법은 다양한 컴퓨터 수단을 통하여 수행될 수 있는 프로그램 명령 형태로 구현되어 컴퓨터 판독 가능 매체에 기록될 수 있다. 상기 컴퓨터 판독 가능 매체는 프로그램 명령, 데이터 파일, 데이터 구조 등

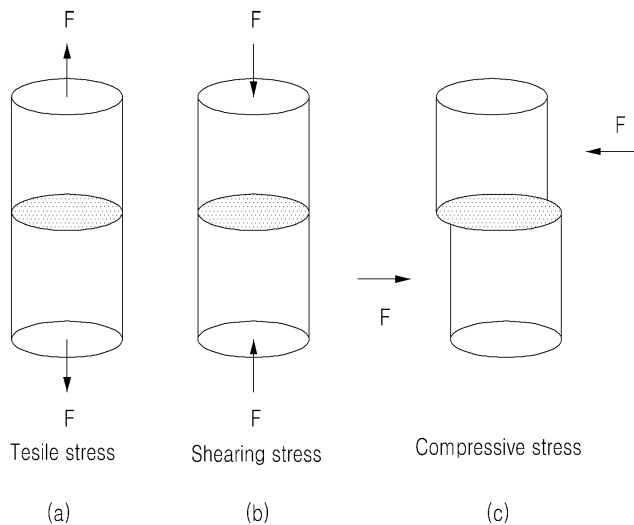
을 단독으로 또는 조합하여 포함할 수 있다. 상기 매체에 기록되는 프로그램 명령은 실시예를 위하여 특별히 설계되고 구성된 것들이거나 컴퓨터 소프트웨어 당업자에게 공지되어 사용 가능한 것일 수도 있다. 컴퓨터 판독 가능 기록 매체의 예에는 하드 디스크, 플로피 디스크 및 자기 테이프와 같은 자기 매체(magnetic media), CD-ROM, DVD와 같은 광기록 매체(optical media), 플롭티컬 디스크(floptical disk)와 같은 자기-광 매체(magneto-optical media), 및 롬(ROM), 램(RAM), 플래시 메모리 등과 같은 프로그램 명령을 저장하고 수행하도록 특별히 구성된 하드웨어 장치가 포함된다. 프로그램 명령의 예에는 컴파일러에 의해 만들어지는 것과 같은 기계어 코드뿐만 아니라 인터프리터 등을 사용해서 컴퓨터에 의해서 실행될 수 있는 고급 언어 코드를 포함한다. 상기된 하드웨어 장치는 실시예의 동작을 수행하기 위해 하나 이상의 소프트웨어 모듈로서 작동하도록 구성될 수 있으며, 그 역도 마찬가지이다.

[0060] 이상과 같이 실시예들이 비록 한정된 실시예와 도면에 의해 설명되었으나, 해당 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 상기의 기재로부터 다양한 수정 및 변형이 가능하다. 예를 들어, 설명된 기술들이 설명된 방법과 다른 순서로 수행되거나, 및/또는 설명된 시스템, 구조, 장치, 회로 등의 구성요소들이 설명된 방법과 다른 형태로 결합 또는 조합되거나, 다른 구성요소 또는 균등물에 의하여 대치되거나 치환되더라도 적절한 결과가 달성될 수 있다.

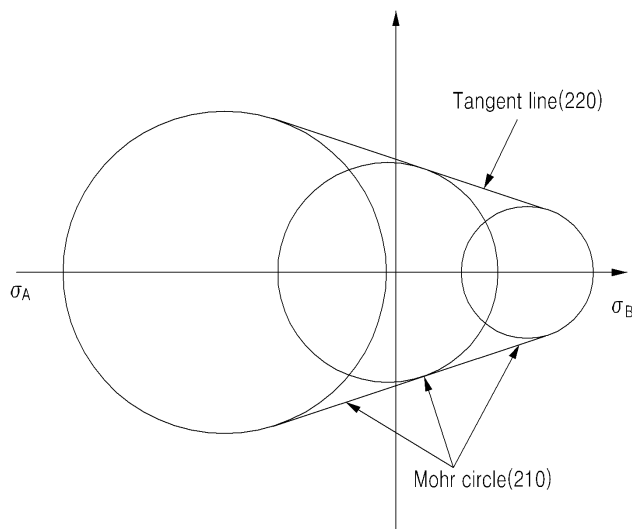
[0061] 그러므로, 다른 구현들, 다른 실시예들 및 특허청구범위와 균등한 것들도 후술하는 특허청구범위의 범위에 속한다.

도면

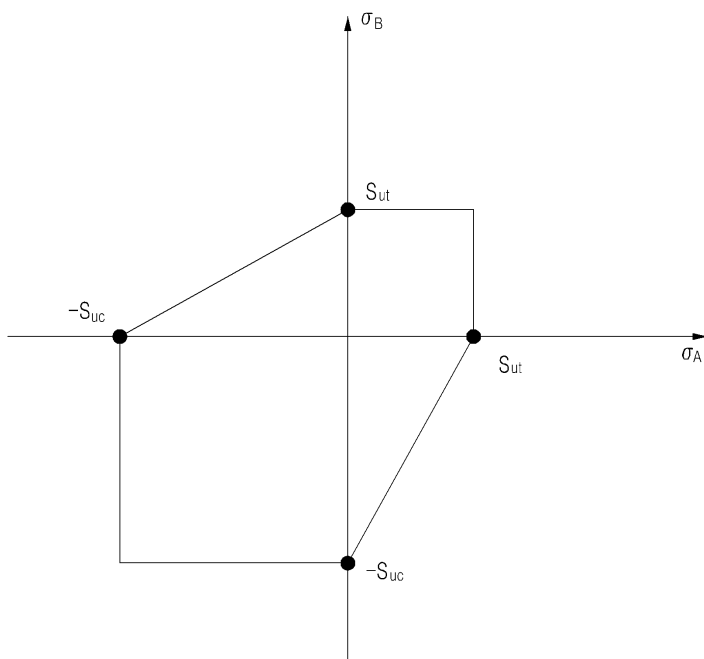
도면1



도면2



도면3

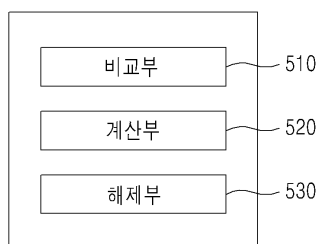


도면4

```

1.  foreach particle i, j (i < j)
2.      q = distance i, j
3.      if q = default density h
4.          //there is no external force break
5.          break
6.      else
7.          computation stress g
8.          if  $g < g_e^{BCM}$ 
9.              apply spring displacement
10.         else
11.             unbind
    
```

도면5



도면6

