(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2025-0018660
(43) 공개일자 2025년02월07일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G06F 30/25 (2020.01) *G06F 111/10* (2020.01)
G06F 119/14 (2020.01) *G06F 18/2415* (2023.01)
G06F 30/27 (2020.01) *G06N 3/04* (2023.01)
G06N 3/08 (2023.01)
(52) CPC특허분류
G06F 30/25 (2020.01)
G06F 18/2415 (2023.01)
(21) 출원번호 10-2023-0099539
(22) 출원일자 2023년07월31일
심사청구일자 2023년07월31일

(71) 출원인
인하대학교 산학협력단
인천광역시 미추홀구 인하로 100(용현동, 인하대학교)
(72) 발명자
신병석
서울특별시 서초구
성수경
인천광역시 미추홀구 인하로 115-11, 가온빌 405호(용현동)
(74) 대리인
양성보

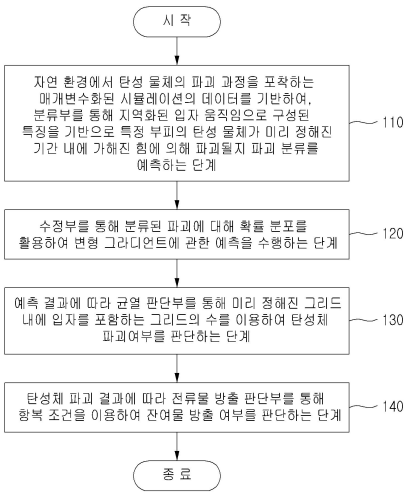
전체 청구항 수 : 총 8 항

(54) 발명의 명칭 **트레스카 항복조건을 활용한 탄성체 파괴 시뮬레이션 방법 및 시스템**

(57) 요 약

트레스카 항복조건을 활용한 탄성체 파괴 모델링 방법 및 시스템이 제시된다. 본 발명에서 제안하는 트레스카 항복조건을 활용한 탄성체 파괴 모델링 방법은 자연 환경에서 탄성체의 파괴 과정을 포착하는 매개변수화된 시뮬레이션의 데이터를 기반하여, 분류부를 통해 지역화된 입자 움직임으로 구성된 특징을 기반으로 특정 부피의 탄성체가 미리 정해진 기간 내에 가해진 힘에 의해 파괴될지 파괴 분류를 예측하는 단계, 수정부를 통해 상기 분류된 파괴에 대해 확률 분포를 활용하여 변형 그라디언트에 관한 예측을 수행하는 단계, 상기 예측 결과에 따라 균열 판단부를 통해 미리 정해진 그리드 내에 입자를 포함하는 그리드의 수를 이용하여 탄성체 파괴여부를 판단하는 단계 및 상기 탄성체 파괴 결과에 따라 잔류물 방출 판단부를 통해 항복 조건을 이용하여 잔여물 방출 여부를 판단하는 단계를 포함한다.

대 표 도 - 도1



(52) CPC특허분류
G06F 30/27 (2020.01)
G06N 3/04 (2023.01)
G06N 3/08 (2023.01)
G06F 2111/10 (2020.01)
G06F 2119/14 (2020.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1711179347
과제번호 00155915
부처명 과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명 정보통신기획평가원
연구사업명 정보통신인재양성(교육운영수익)
연구과제명 [Ezbaro][정부+민간] 인공지능융합혁신인재양성(2차년도)
기 여 율 10/100
과제수행기관명 인하대학교 산학협력단
연구기간 2023.01.01 ~ 2023.12.31
이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1711182418
과제번호 2022R1A2B5B01001553
부처명 과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명 한국연구재단
연구사업명 중견후속연구
연구과제명 [Ezbaro] 의료용 메타휴먼 응용을 위한 초고실감 인체모델링기술개발
기 여 율 45/100
과제수행기관명 인하대학교
연구기간 2023.03.01 ~ 2024.02.29
이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1711186835
과제번호 2022R1A4A1033549
부처명 과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명 한국연구재단
연구사업명 기초연구실육성사업(BRL)
연구과제명 [Ezbaro] 인공지능 융합형 메타휴먼 플랫폼 연구실
기 여 율 45/100
과제수행기관명 인하대학교
연구기간 2023.03.01 ~ 2024.02.29

명 세 서

청구범위

청구항 1

자연 환경에서 탄성체의 파괴 과정을 포착하는 매개변수화된 시뮬레이션의 데이터를 기반하여, 분류부를 통해 지역화된 입자 움직임으로 구성된 특징을 기반으로 특정 부피의 탄성체가 미리 정해진 기간 내에 가해진 힘에 의해 파괴될지 파괴 분류를 예측하는 단계;

수정부를 통해 상기 분류된 파괴에 대해 확률 분포를 활용하여 변형 그라디언트에 관한 예측을 수행하는 단계;

상기 예측 결과에 따라 균열 판단부를 통해 미리 정해진 그리드 내에 입자를 포함하는 그리드의 수를 이용하여 탄성체 파괴여부를 판단하는 단계; 및

상기 탄성체 파괴 결과에 따라 잔류물 방출 판단부를 통해 항복 조건을 이용하여 잔여물 방출 여부를 판단하는 단계

를 포함하는 탄성체 파괴 모델링 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 분류부를 통해 지역화된 입자 움직임으로 구성된 특징을 기반으로 특정 부피의 탄성체가 미리 정해진 기간 내에 가해진 힘에 의해 파괴될지 파괴 분류를 예측하는 단계는,

탄성체 입자가 파괴된 상태로 변할지 여부를 예측하기 위한 DL(Depth Learning)을 통해 탄성체 입자가 배치된 그리드 영역 내에서 탄성체 입자의 변화를 나타내는 변형 그라디언트, 탄성체 입자의 질량, 파괴 여부를 결정하는 유형 지시자, 탄성체 입자에 가해지는 힘을 이용하여 탄성체 입자의 파괴 상태를 학습하고, 통계적 분석을 통해 파괴의 발생 여부를 예측하는

탄성체 파괴 모델링 방법.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 수정부를 통해 상기 분류된 파괴에 대해 확률 분포를 활용하여 변형 그라디언트에 관한 예측을 수행하는 단계는,

상기 학습된 탄성체 입자의 변형 그라디언트에 따라 파괴된 탄성체 입자의 변형 그라디언트를 나타내는 값을 수정하여, 정규 분포를 따르는 변형 그라디언트 수정 집합을 나타내고, 평균과 분산 함수를 기반으로 하는 손실 함수를 통해 유도되는 탄성체의 변형 그라디언트 변경을 예측하는

탄성체 파괴 모델링 방법.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 탄성체 파괴 결과에 따라 잔류물 방출 판단부를 통해 항복 조건을 이용하여 잔여물 방출 여부를 판단하는 단계는,

복수의 방향으로부터 탄성체에 가해지는 힘과 탄성체 표면의 전단 응력을 계산하여 탄성체의 파괴 순간을 예측하기 위해 탄성체에 가해지는 힘을 추정하는 최대 변형 에너지 이론 및 최대 전단 응력 이론을 이용하여 잔류물 방출 여부를 근사화하고,

탄성체에 가해지는 응력이 인장 시험의 최대 응력과 동일한 경우에 발생하는 트레스카 항복 조건을 이용하여 탄

성체의 파괴 순간을 예측하는

탄성체 파괴 모델링 방법.

청구항 5

자연 환경에서 탄성 물체의 파괴 과정을 포착하는 매개변수화된 시뮬레이션의 데이터를 기반하여, 지역화된 입자 움직임으로 구성된 특징을 기반으로 특정 부피의 탄성 물체가 미리 정해진 기간 내에 가해진 힘에 의해 파괴될지 파괴 분류를 예측하는 분류부;

상기 분류된 파괴에 대해 확률 분포를 활용하여 변형 그라디언트에 관한 예측을 수행하는 수정부;

상기 예측 결과에 따라 미리 정해진 그리드 내에 입자를 포함하는 그리드의 수를 이용하여 탄성체 파괴여부를 판단하는 균열 판단부; 및

상기 탄성체 파괴 결과에 따라 항복 조건을 이용하여 잔여물 방출 여부를 판단하는 잔류물 방출 판단부

를 포함하는 탄성체 파괴 모델링 시스템.

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 분류부는,

탄성체 입자가 파괴된 상태로 변할지 여부를 예측하기 위한 DL(Depth Learning)을 통해 탄성체 입자가 배치된 그리드 영역 내에서 탄성체 입자의 변화를 나타내는 변형 그라디언트, 탄성체 입자의 질량, 파괴 여부를 결정하는 유형 지시자, 탄성체 입자에 가해지는 힘을 이용하여 탄성체 입자의 파괴 상태를 학습하고, 통계적 분석을 통해 파괴의 발생 여부를 예측하는

탄성체 파괴 모델링 시스템.

청구항 7

제6항에 있어서,

상기 수정부는,

상기 학습된 탄성체 입자의 변형 그라디언트에 따라 파괴된 탄성체 입자의 변형 그라디언트를 나타내는 값을 수정하여, 정규 분포를 따르는 변형 그라디언트 수정 집합을 나타내고, 평균과 분산 함수를 기반으로 하는 손실함수를 통해 유도되는 탄성체의 변형 그라디언트 변경을 예측하는

탄성체 파괴 모델링 시스템.

청구항 8

제5항에 있어서,

상기 잔류물 방출 판단부는,

복수의 방향으로부터 탄성체에 가해지는 힘과 탄성체 표면의 전단 응력을 계산하여 탄성체의 파괴 순간을 예측하기 위해 탄성체에 가해지는 힘을 추정하는 최대 변형 에너지 이론 및 최대 전단 응력 이론을 이용하여 잔류물 방출 여부를 근사화하고,

탄성체에 가해지는 응력이 인장 시험의 최대 응력과 동일한 경우에 발생하는 트레스카 항복 조건을 이용하여 탄성체의 파괴 순간을 예측하는

탄성체 파괴 모델링 시스템.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 트레스카 항복조건을 활용한 탄성체 파괴 시뮬레이션 방법 및 시스템에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 탄성 물체의 압축에 의한 파괴, 예를 들어 물풍선의 터짐이나 과일의 껍질과 과육이 힘을 가하여 분리되는 현상은 영화나 게임 등의 미디어 콘텐츠에서 자주 발생한다. 이러한 효과를 시뮬레이션하기 위해서는 진행적인 파괴 과정과 발생된 잔해의 상세한 모델링이 필요하다. 정확한 변형 과정을 표현하기 위해 많은 연구들이 수행되었다. 유한요소법(Finite Elements Method; FEM)은 탄성 물체의 변형 과정과 관련된 미분방정식을 수치적으로 해결하기 위한 메쉬 기반 시뮬레이션 방법이다. FEM은 구조와 힘의 상태를 예측함으로써 탄성 물체의 변형을 표현할 수 있다. 그러나 탄성 물체 모델이 많은 메쉬를 가지거나 비선형 식의 계산이 필요한 경우, 해석적인 데이터를 얻는 것은 시간이 많이 소요될 수 있다. 이에 비해 메쉬리스 방법은 입자들의 자유운동 결과를 기반으로 유체의 흐름이나 물체의 변형을 시뮬레이션 한다. FEM과 비교할 때, 이러한 방법은 입자가 받는 힘의 결과를 정확하게 표현할 수 있다. 그러나 물체를 구성하는 입자들이 연결되어 있지 않기 때문에 힘을 받을 때 특정한 기하학적 특성을 유지하기는 어렵다. MPM(Material Point Method)은 입자 기반의 혼합 오일러-라그랑지안 이산화 방법으로, 임의로 큰 위상 변화를 자동으로 지원하며, 상세한 파괴, 접촉 및 충돌을 다른 변형 방법보다 자세히 시뮬레이션 할 수 있는 장점이 있지만, 상세한 물리 현상을 시뮬레이션 하는 데 높은 계산 비용이 발생한다. MPM의 또 다른 단점은 탄성 물체의 파괴를 위한 기준 중 일부가 커스터마이징 된 계수들을 포함하고 있다는 것이다.

[0003] 종래기술에 따르면 MPM들은 힘에 영향을 받는 물체의 파괴와 절단을 근사화하는 다양한 이론을 적용하는 데 초점을 맞추었다. 이러한 방법들은 현실적인 결과를 보여주었지만, 고성능의 컴퓨팅 요구사항으로 인해 실시간 시뮬레이션이 불가능하였다. 또한, 탄성 물체가 압축으로 인해 파괴될 때, 기존 MPM은 잔여물의 방출을 시뮬레이션 할 수 없다.

선행기술문헌

특허문헌

[0004] (특허문헌 0001) [1] O. Cazacu, N. Chandola, J. Alves, B. Revil-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, vol. 47, pp. 194-205, 2014.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0005] 본 발명이 이루고자 하는 기술적 과제는 DL(Depth Learning)을 기반으로 한 파괴 생성 방법과 트레스카 항복조건을 이용한 탄성체 파괴 시뮬레이션 방법 및 시스템을 제공하는데 있다. DL 기반의 탄성체 파괴 시뮬레이션 방법 및 시스템을 통해 물리적으로 정확한 시뮬레이션으로부터 파괴 과정을 학습하여 낮은 해상도에서도 생생한 파괴 과정을 효과적으로 시뮬레이션하고, DL을 활용하여 특정 데이터를 훈련하고 통계적 분석을 통해 파괴의 발생 여부를 추론하고자 한다.

과제의 해결 수단

[0006] 일 측면에 있어서, 본 발명에서 제안하는 트레스카 항복조건을 활용한 탄성체 파괴 모델링 방법은 자연 환경에서 탄성체의 파괴 과정을 포착하는 매개변수화된 시뮬레이션의 데이터를 기반하여, 분류부를 통해 지역화된 입자 움직임으로 구성된 특징을 기반으로 특정 부피의 탄성체가 미리 정해진 기간 내에 가해진 힘에 의해 파괴될지 파괴 분류를 예측하는 단계, 수정부를 통해 상기 분류된 파괴에 대해 확률 분포를 활용하여 변형 그라디언트에 관한 예측을 수행하는 단계, 상기 예측 결과에 따라 균열 판단부를 통해 미리 정해진 그리드 내에 입자를 포함하는 그리드의 수를 이용하여 탄성체 파괴여부를 판단하는 단계 및 상기 탄성체 파괴 결과에 따라 잔류물 방출 판단부를 통해 항복 조건을 이용하여 잔여물 방출 여부를 판단하는 단계를 포함한다.

[0007] 상기 분류부를 통해 지역화된 입자 움직임으로 구성된 특징을 기반으로 특정 부피의 탄성체가 미리 정해진 기간 내에 가해진 힘에 의해 파괴될지 파괴 분류를 예측하는 단계는 탄성체 입자가 파괴된 상태로 변할지 여부를 예측하기 위한 DL(Depth Learning)을 통해 탄성체 입자가 배치된 그리드 영역 내에서 탄성체 입자의 변화를 나타

내는 변형 그라디언트, 탄성체 입자의 질량, 파괴 여부를 결정하는 유형 지시자, 탄성체 입자에 가해지는 힘을 이용하여 탄성체 입자의 파괴 상태를 학습하고, 통계적 분석을 통해 파괴의 발생 여부를 예측한다.

[0008] 상기 수정부를 통해 상기 분류된 파괴에 대해 확률 분포를 활용하여 변형 그라디언트에 관한 예측을 수행하는 단계는 상기 학습된 탄성체 입자의 변형 그라디언트에 따라 파괴된 탄성체 입자의 변형 그라디언트를 나타내는 값을 수정하여, 정규 분포를 따르는 변형 그라디언트 수정 집합을 나타내고, 평균과 분산 함수를 기반으로 하는 손실 함수를 통해 유도되는 탄성체의 변형 그라디언트 변경을 예측한다.

[0009] 상기 탄성체 파괴 결과에 따라 잔류물 방출 판단부를 통해 항복 조건을 이용하여 잔여물 방출 여부를 판단하는 단계는 복수의 방향으로부터 탄성체에 가해지는 힘과 탄성체 표면의 전단 응력을 계산하여 탄성체의 파괴 순간을 예측하기 위해 탄성체에 가해지는 힘을 추정하는 최대 변형 에너지 이론 및 최대 전단 응력 이론을 이용하여 잔류물 방출 여부를 근사화하고, 탄성체에 가해지는 응력이 인장 시험의 최대 응력과 동일한 경우에 발생하는 트레스카 항복 조건을 이용하여 탄성체의 파괴 순간을 예측한다.

[0010] 또 다른 일 측면에 있어서, 본 발명에서 제안하는 트레스카 항복조건을 활용한 탄성체 파괴 모델링 시스템은 자연 환경에서 탄성 물체의 파괴 과정을 포착하는 매개변수화된 시뮬레이션의 데이터를 기반하여, 지역화된 입자 움직임으로 구성된 특징을 기반으로 특정 부피의 탄성 물체가 미리 정해진 기간 내에 가해진 힘에 의해 파괴될지 파괴 분류를 예측하는 분류부, 상기 분류된 파괴에 대해 확률 분포를 활용하여 변형 그라디언트에 관한 예측을 수행하는 수정부, 상기 예측 결과에 따라 미리 정해진 그리드 내에 입자를 포함하는 그리드의 수를 이용하여 탄성체 파괴여부를 판단하는 균열 판단부 및 상기 탄성체 파괴 결과에 따라 항복 조건을 이용하여 잔여물 방출 여부를 판단하는 잔류물 방출 판단부를 포함한다.

발명의 효과

[0011] 본 발명의 실시예들에 따르면 DL(Depth Learning)을 기반으로 한 파괴 생성 방법과 트레스카 항복조건을 이용한 탄성체 파괴 시뮬레이션 방법 및 시스템을 통해 물리적으로 정확한 시뮬레이션으로부터 파괴 과정을 학습하여 낮은 해상도에서도 생생한 파괴 과정을 효과적으로 시뮬레이션하고, DL을 활용하여 특정 데이터를 훈련하고 통계적 분석을 통해 파괴의 발생 여부를 추론할 수 있다. 이를 통해 MPM 기반의 시뮬레이션의 시각적 정확성을 향상시킬 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0012] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 트레스카 항복조건을 활용한 탄성체 파괴 모델링 방법을 설명하기 위한 흐름도이다.

도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 트레스카 항복조건을 활용한 탄성체 파괴 모델링 시스템의 구성을 나타내는 도면이다.

도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 DL 레이어 구조를 나타내는 도면이다.

도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 균열 판단 알고리즘을 나타내는 도면이다.

도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 트레스카 항복 기준에 따른 응력과 거리를 설명하기 위한 도면이다.

도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른 탄성체의 균열 형성과정을 설명하기 위한 도면이다.

도 7은 본 발명의 일 실시예에 따른 탄성체의 균열 및 잔류물 방출 과정을 설명하기 위한 도면이다.

도 8은 본 발명의 일 실시예에 따른 대각선 힘을 받는 탄성체의 균열 및 잔류물 방출 과정을 설명하기 위한 도면이다.

도 9는 본 발명의 일 실시예에 따른 시뮬레이션 프레임 속도를 MPM과 비교한 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0013] 본 발명은 DL(Depth Learning)을 기반으로 한 파괴 생성 방법과 트레스카 항복조건을 이용한 탄성 물체의 파괴 근사화를 제안한다. 이를 통해 MPM 기반의 시뮬레이션의 시각적 정확성을 향상시킬 수 있다. 제안된 DL 기반의 파괴 생성 방법은 물리적으로 정확한 시뮬레이션으로부터 파괴 과정을 학습하여 낮은 해상도에서도 생생한 파괴 과정을 효과적으로 시뮬레이션 할 수 있다. 탄성 물체의 파괴를 기반으로 한 시뮬레이션에서 DL을 활용하여 특정 데이터를 훈련하고 통계적 분석을 통해 파괴의 발생 여부를 추론한다. 파괴의 발생이 확인된 후, 재료 변화

를 결정하는 중요한 요소인 변형 그라디언트의 값은 평균과 분산 함수를 기반으로 한 손실 함수를 통해 유도된다. 이러한 값은 탄성 물체의 파괴 순간에 파괴를 자연스러운 방향과 속도로 수정하는 데 사용된다. 또한, 잔여물의 근사화는 물체에 가해지는 힘과 그 효과를 추정하는 응력 이론을 활용한다. 응력 이론은 다양한 방향에서 가해지는 힘과 표면의 전단 응력을 계산하여 물체의 파괴 순간을 예측한다. 입자 기반 방법에서는 물체를 구성하는 입자들의 거리, 면적 또는 부피의 변화를 기반으로 항복 조건을 추정할 수 있다는 가설이 제기된다. 이를 검증하기 위해 트레스카 항복조건을 활용하여 물체에 가해지는 최대 및 최소 응력을 기반으로 파괴의 발생을 결정한다. 탄성 물체나 개별 입자의 최대 및 최소 변화를 트레스카 항복조건을 기반으로 한 근사식에 적용함으로써 파괴의 순간을 예측할 수 있다. 파괴의 순간에는 입자 내에 누적된 응력이 탄성 물체 내의 파괴로 외부로 방출된다.

[0014] 본 발명에서는 MPM을 사용하여 충격을 받는 탄성 물체에서 파괴 생성 과정과 잔여물의 방출을 모델링하기 위해 입자로 구성된 모델에서 실험을 수행한다. 제안된 방법의 결과를 동일한 환경에서 기존 MPM의 결과와 비교함으로써 제안된 방법이 파괴 과정을 자세하게 시뮬레이션 한다는 것을 확인할 수 있다.

[0015] 본 발명에서는 탄성 물체에 관련된 다양한 파괴 과정 중에서 압축에 초점을 맞추고 있다. 파괴를 예측하고 DL을 활용하여 파괴 생성 과정을 시뮬레이션 하여 고품질의 결과를 얻을 수 있다. 예측된 항복 조건까지 누적된 힘은 또한 탄성 물체를 구성하는 입자에 적용되어 잔여물의 방출을 유발한다. 제안하는 방법은 미디어에서 사용할 수 있는 탄성 물체의 압축 파괴 과정에 대해 더 높은 품질의 표현을 제공할 수 있다. 또한, 풍선과 같은 실제 물체의 인장강도를 적용하여 제품 개발에 기여할 것으로 예측된다. 이하, 본 발명의 실시 예를 첨부된 도면을 참조하여 상세하게 설명한다.

[0017] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 트레스카 항복조건을 활용한 탄성체 파괴 모델링 방법을 설명하기 위한 흐름도이다.

[0018] 본 발명은 탄성체의 현실적인 균열 모델링에 대한 데이터 기반 접근 방식을 위해 자연 환경에서 탄성체의 파괴 과정을 포착하는 매개변수화 된 시뮬레이션의 데이터를 기반으로 파괴 생성에 관한 통계를 추론하기 위한 것이다.

[0019] 본 발명의 실시예에 따르면, 곡률 임계 값과 같은 수학적으로 정의된 추가 매개변수가 필요하지 않다. 파괴된 탄성체의 영역을 나타내기 위해 매개변수화 된 시뮬레이션에서 추출된 통계 모델과 데이터를 활용하여 고려해야 할 두 가지 구성 요소만 고려한다: 파괴 분류 및 변형 그라디언트 수정. 지역화된 입자 움직임으로 구성된 특징을 기반으로 분류부(classifier)는 특정 부피의 탄성 물체가 주어진 기간 내에 힘에 의해 파괴될지 예측한다. 이후, 분류된 파괴에 대해 수정부(modifier)를 통해 확률 분포를 활용하여 변형 그라디언트에 관한 예측을 수행한다.

[0020] 본 발명의 실시예에 따른 트레스카 항복조건을 활용한 탄성체 파괴 모델링 방법은 자연 환경에서 탄성체의 파괴 과정을 포착하는 매개변수화된 시뮬레이션의 데이터를 기반하여, 분류부를 통해 지역화된 입자 움직임으로 구성된 특징을 기반으로 특정 부피의 탄성체가 미리 정해진 기간 내에 가해진 힘에 의해 파괴될지 파괴 분류를 예측하는 단계(110), 수정부를 통해 상기 분류된 파괴에 대해 확률 분포를 활용하여 변형 그라디언트에 관한 예측을 수행하는 단계(120), 상기 예측 결과에 따라 균열 판단부를 통해 미리 정해진 그리드 내에 입자를 포함하는 그리드의 수를 이용하여 탄성체 파괴여부를 판단하는 단계(130) 및 상기 탄성체 파괴 결과에 따라 잔류물 방출 판단부를 통해 항복 조건을 이용하여 잔여물 방출 여부를 판단하는 단계(140)를 포함한다.

[0021] 단계(110)에서, 분류부를 통해 지역화된 입자 움직임으로 구성된 특징을 기반으로 특정 부피의 탄성체가 미리 정해진 기간 내에 가해진 힘에 의해 파괴될지 파괴 분류를 예측한다.

[0022] 본 발명의 실시예에 따르면, 탄성체 입자가 파괴된 상태로 변할지 여부를 예측하기 위한 DL(Depth Learning)을 통해 탄성체 입자가 배치된 그리드 영역 내에서 탄성체 입자의 변화를 나타내는 변형 그라디언트, 탄성체 입자의 질량, 파괴 여부를 결정하는 유형 지시자, 탄성체 입자에 가해지는 힘을 이용하여 탄성체 입자의 파괴 상태를 학습하고, 통계적 분석을 통해 파괴의 발생 여부를 예측한다.

[0023] 단계(120)에서, 상기 수정부를 통해 상기 분류된 파괴에 대해 확률 분포를 활용하여 변형 그라디언트에 관한 예측을 수행한다.

[0024] 본 발명의 실시예에 따르면, 상기 학습된 탄성체 입자의 변형 그라디언트에 따라 파괴된 탄성체 입자의 변형 그

라디언트를 나타내는 값을 수정하여, 정규 분포를 따르는 변형 그라디언트 수정 집합을 나타내고, 평균과 분산 함수를 기반으로 하는 손실 함수를 통해 유도되는 탄성체의 변형 그라디언트 변경을 예측한다.

[0025] 단계(130)에서, 상기 예측 결과에 따라 균열 판단부를 통해 미리 정해진 그리드 내에 입자를 포함하는 그리드의 수를 이용하여 탄성체 파괴여부를 판단한다.

[0026] 단계(140)에서, 상기 탄성체 파괴 결과에 따라 잔류물 방출 판단부를 통해 항복 조건을 이용하여 잔여물 방출 여부를 판단한다.

[0027] 본 발명의 실시예에 따르면, 복수의 방향으로부터 탄성체에 가해지는 힘과 탄성체 표면의 전단 응력을 계산하여 탄성체의 파괴 순간을 예측하기 위해 탄성체에 가해지는 힘을 추정하는 최대 변형 에너지 이론 및 최대 전단 응력 이론을 이용하여 잔류물 방출 여부를 근사화하고, 탄성체에 가해지는 응력이 인장 시험의 최대 응력과 동일한 경우에 발생하는 트레스카 항복 조건을 이용하여 탄성체의 파괴 순간을 예측한다.

[0029] 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 트레스카 항복조건을 활용한 탄성체 파괴 모델링 시스템의 구성을 나타내는 도면이다.

[0030] 본 실시예에 따른 탄성체 파괴 모델링 시스템(200)은 프로세서(210), 버스(220), 네트워크 인터페이스(230), 메모리(240) 및 데이터베이스(250)를 포함할 수 있다. 메모리(240)는 운영체제(241) 및 트레스카 항복조건을 활용한 탄성체 파괴 모델링 루틴(242)을 포함할 수 있다. 프로세서(210)는 분류부(211), 수정부(212), 균열 판단부(213) 및 잔류물 방출 판단부(214)를 포함할 수 있다. 다른 실시예들에서 탄성체 파괴 모델링 시스템(200)은 도 2의 구성요소들보다 더 많은 구성요소들을 포함할 수도 있다. 그러나, 대부분의 종래기술적 구성요소들을 명확하게 도시할 필요성은 없다. 예를 들어, 탄성체 파괴 모델링 시스템(200)은 디스플레이나 트랜시버(transceiver)와 같은 다른 구성요소들을 포함할 수도 있다.

[0031] 메모리(240)는 컴퓨터에서 판독 가능한 기록 매체로서, RAM(random access memory), ROM(read only memory) 및 디스크 드라이브와 같은 비소멸성 대용량 기록장치(permanent mass storage device)를 포함할 수 있다. 또한, 메모리(240)에는 운영체제(241)와 트레스카 항복조건을 활용한 탄성체 파괴 모델링 루틴(242)을 위한 프로그램 코드가 저장될 수 있다. 이러한 소프트웨어 구성요소들은 드라이브 메커니즘(drive mechanism, 미도시)을 이용하여 메모리(240)와는 별도의 컴퓨터에서 판독 가능한 기록 매체로부터 로딩될 수 있다. 이러한 별도의 컴퓨터에서 판독 가능한 기록 매체는 플로피 드라이브, 디스크, 테이프, DVD/CD-ROM 드라이브, 메모리 카드 등의 컴퓨터에서 판독 가능한 기록 매체(미도시)를 포함할 수 있다. 다른 실시예에서 소프트웨어 구성요소들은 컴퓨터에서 판독 가능한 기록 매체가 아닌 네트워크 인터페이스(230)를 통해 메모리(240)에 로딩될 수도 있다.

[0032] 버스(220)는 탄성체 파괴 모델링 시스템(200)의 구성요소들간의 통신 및 데이터 전송을 가능하게 할 수 있다. 버스(220)는 고속 시리얼 버스(high-speed serial bus), 병렬 버스(parallel bus), SAN(Storage Area Network) 및/또는 다른 적절한 통신 기술을 이용하여 구성될 수 있다.

[0033] 네트워크 인터페이스(230)는 탄성체 파괴 모델링 시스템(200)을 컴퓨터 네트워크에 연결하기 위한 컴퓨터 하드웨어 구성요소일 수 있다. 네트워크 인터페이스(230)는 탄성체 파괴 모델링 시스템(200)을 무선 또는 유선 커넥션을 통해 컴퓨터 네트워크에 연결시킬 수 있다.

[0034] 데이터베이스(250)는 항복조건을 활용한 탄성체 파괴 모델링을 위해 필요한 모든 정보를 저장 및 유지하는 역할을 할 수 있다. 도 2에서는 탄성체 파괴 모델링 시스템(200)의 내부에 데이터베이스(250)를 구축하여 포함하는 것으로 도시하고 있으나, 이에 한정되는 것은 아니며 시스템 구현 방식이나 환경 등에 따라 생략될 수 있고 혹은 전체 또는 일부의 데이터베이스가 별개의 다른 시스템 상에 구축된 외부 데이터베이스로서 존재하는 것 또한 가능하다.

[0035] 프로세서(210)는 기본적인 산술, 로직 및 탄성체 파괴 모델링 시스템(200)의 입출력 연산을 수행함으로써, 컴퓨터 프로그램의 명령을 처리하도록 구성될 수 있다. 명령은 메모리(240) 또는 네트워크 인터페이스(230)에 의해, 그리고 버스(220)를 통해 프로세서(210)로 제공될 수 있다. 프로세서(210)는 분류부(211), 수정부(212), 균열 판단부(213) 및 잔류물 방출 판단부(214)를 위한 프로그램 코드를 실행하도록 구성될 수 있다. 이러한 프로그램 코드는 메모리(240)와 같은 기록 장치에 저장될 수 있다.

[0036] 분류부(211), 수정부(212), 균열 판단부(213) 및 잔류물 방출 판단부(214)는 도 1의 단계들(110~140)을 수행하

기 위해 구성될 수 있다.

[0037] 탄성체 파괴 모델링 시스템(200)은 분류부(211), 수정부(212), 균열 판단부(213) 및 잔류물 방출 판단부(214)를 포함할 수 있다.

[0038] 본 발명의 실시예에 따른 분류부(211)는 지역화된 입자 움직임으로 구성된 특징을 기반으로 특정 부피의 탄성체가 미리 정해진 기간 내에 가해진 힘에 의해 파괴될지 파괴 분류를 예측한다.

[0039] 본 발명의 실시예에 따른 분류부(211)는 탄성체 입자가 파괴된 상태로 변할지 여부를 예측하기 위한 DL(Depth Learning)을 통해 탄성체 입자가 배치된 그리드 영역 내에서 탄성체 입자의 변화를 나타내는 변형 그라디언트, 탄성체 입자의 질량, 파괴 여부를 결정하는 유형 지시자, 탄성체 입자에 가해지는 힘을 이용하여 탄성체 입자의 파괴 상태를 학습하고, 통계적 분석을 통해 파괴의 발생 여부를 예측한다.

[0040] 본 발명의 실시예에 따른 수정부(212)는 상기 분류된 파괴에 대해 확률 분포를 활용하여 변형 그라디언트에 관한 예측을 수행한다.

[0041] 본 발명의 실시예에 따른 수정부(212)는 상기 학습된 탄성체 입자의 변형 그라디언트에 따라 파괴된 탄성체 입자의 변형 그라디언트를 나타내는 값을 수정하여, 정규 분포를 따르는 변형 그라디언트 수정 집합을 나타내고, 평균과 분산 함수를 기반으로 하는 손실 함수를 통해 유도되는 탄성체의 변형 그라디언트 변경을 예측한다.

[0042] 본 발명의 실시예에 따른 균열 판단부(213)는 미리 정해진 그리드 내에 입자를 포함하는 그리드의 수를 이용하여 탄성체 파괴여부를 판단한다.

[0043] 본 발명의 실시예에 따른 잔류물 방출 판단부(214)는 상기 탄성체 파괴 결과에 따라 항복 조건을 이용하여 잔여물 방출 여부를 판단한다.

[0044] 본 발명의 실시예에 따른 잔류물 방출 판단부(214)는 복수의 방향으로부터 탄성체에 가해지는 힘과 탄성체 표면의 전단 응력을 계산하여 탄성체의 파괴 순간을 예측하기 위해 탄성체에 가해지는 힘을 추정하는 최대 변형 에너지 이론 및 최대 전단 응력 이론을 이용하여 잔류물 방출 여부를 근사화하고, 탄성체에 가해지는 응력이 인장 시험의 최대 응력과 동일한 경우에 발생하는 트레스카 항복 조건을 이용하여 탄성체의 파괴 순간을 예측한다.

[0046] 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 DL 레이어 구조를 나타내는 도면이다.

[0047] 본 발명의 실시예에 따른 탄성체 파괴 모델은 입자 정보를 기능 기술자 $x \in A\{f, m, j, q\}$ 의 형태로 제공하여 입자가 파괴된 상태로 변할지를 추론하도록 설계되었다. 여기서 A는 입자가 배치된 그리드 영역을 나타내며, f는 입자의 변화를 나타내는 변형 그라디언트, m은 입자의 질량, q는 파괴 여부를 결정하는 유형 지시자로 사용되고, j는 입자에 가해지는 힘을 나타낸다. 모델은 입자 데이터 $X = \{x_1, x_2, \ldots, x_N\}$와 파괴 판정 값 $Q = \{q_1, q_2, \ldots, q_N\}$로 구성된 주어진 데이터셋에서 학습된다.

[0048] 본 발명의 실시예에 따른 분류부의 목표는 학습된 결과에 따라 특정 벡터 x_i가 q_i로 표현된 클래스에 속할 확률 P_d를 추론하는 것이다. P_d의 확률 분포 함수를 고려할 때, 함수는 주어진 데이터셋에서 근사화 된다. 확률 분포 y_d (x_i, w_d)는 가중치 w_d로 표현된 대상 함수이다. 가중치 w는 학습 단계에서 데이터에 따라 조정 가능한 자유도 값이다. P_d는 다음과 같은 형식의 y_d로 표현될 수 있다:

[0049] $$P_d(q_i|x_i) \approx P_d(q_i|y_d(x_i, w_d)) \quad (1)$$

[0050] 주어진 벡터에 대한 파괴 확률은 최대 우도 방정식을 사용하여 다음과 같이 표현될 수 있다:

[0051] $$Ld(Q|X) = \prod 1 \le i \le N Pd\,(qi|yd(xi, wd)) \quad (2)$$

[0052] 우도의 효율성을 향상시키기 위해, 분류 네트워크의 손실에 소프트맥스 함수가 사용된다. 주어진 데이터셋을 인코딩하고 모델을 학습한 후, 주어진 프레임 내에서 해당 영역이 파괴될지 예측하는 것이 가능해진다:

[0053] 파괴 상태에 관한 추론된 데이터를 기반으로 원래 탄성체의 변형 그라디언트 변경과 파괴를 예측한다. Δf는 파괴된 탄성체 입자의 변형 그라디언트를 나타내는 값이다. 이 값은 시뮬레이션 데이터로부터 학습된 입자의 변형

그라디언트에 따라 수정된다. 분류부와 유사하게 제안된 방법은 특징 X를 기반으로 변형 그라디언트 수정 집합 $\Delta F = \{\Delta f_1, \Delta f_2, \ldots, \Delta f_N\}$을 추론한다. 학습 데이터의 통계는 변형 그라디언트 수정이 평균 유동 방향을 기준으로 정규 분포를 따른다고 가정하는 것이 합리적임을 보여준다. 따라서 수정부는 평균 μ와 분산 σ^2을 가지는 정규 분포를 따르는 수정 함수 $M(\Delta f_i \mid x_i)$로 모델링 된다.

[0054] $$M(\Delta f_i|x_i) = exp\,(-(\Delta f_i-\mu_i)^2/2\sigma_i^2)/(2\pi\sigma^2)^{1/2} \quad (3)$$

[0055] 해당 변형 그라디언트에 대한 손실 함수 식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

[0056] $$L(\Delta F|X) = [\Sigma 1\le i\le N\Sigma 1\le j\le d\{(\Delta fi,j-\mu i)2/\sigma i2+ln\sigma i,j2\}]/2 \quad (4)$$

[0057] 식(4)은 평균 분산 추정(Mean Variance Estimation; MVE) 공식을 기반으로 한다. 이 공식은 오차가 직접적으로 목표 값의 평균을 추정하는 대신에 오차가 평균을 중심으로 정규 분포를 따른다고 가정하여 평균과 분산을 추정한다. 여기서, $\mu(x_i, w_\mu)$와 $\sigma^2(x_i, w_{\sigma 2})$는 각각 가중치 w_μ와 $w_{\sigma 2}$에 의해 근사화된 대상 함수다. 제안된 평균과 분산 함수는 주어진 데이터 $\{X, \Delta F\}$에 대한 손실 함수 L을 최소화하기 위해 가중치 두 개의 집합을 추정하여 근사화 한다.

[0058] 도 3은 제안하는 방법의 DL레이어의 전체 구조를 보여준다. 이는 파괴 형성 여부를 나타내는 분류 결과 q와 파괴 경로를 예측하는 변형 그라디언트 Δf로 구성된다. 또한, 탄성 물체를 구성하는 입자의 개수, 위치, 질량, 힘, 그리고 변형 그라디언트는 파괴 시뮬레이션에서 학습 데이터를 생성하는 초기 조건으로 사용된다. 충분한 데이터 생성의 변동성을 보장하기 위해 각 조건의 범위를 선택한다. 분류와 수정은 입력 데이터 x를 공유하면서 숨겨진 레이어(hidden layer)에서 학습한다. 또한, 숨겨진 레이어는 입력 특징(input feature)에 기반하여 가중치를 적용하여 보상에 가까운 결과를 생성한다. 결과는 출력 레이어(output layer)에 연결된다. 각 레이어의 출력은 쌍곡 탄젠트 함수를 사용하여 활성화된다.

[0060] 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 균열 판단 알고리즘을 나타내는 도면이다.

[0061] 본 발명의 실시예에 따른 균열 판단 알고리즘에 있어서, 파괴 발생의 기준은 N × N × N 그리드 내에 입자를 포함하는 그리드의 수이다. 현재 프레임과 이전 프레임 간의 차이는 각 입자에 대해 저장된 그리드 수와 비교된다.

[0062] 도 4의 알고리즘을 참조하면, 각 입자 X_i에 대해, 입자 X_i를 포함하는 그리드를 기준으로 $N \times N \times N$ 그리드 내에 입자가 포함된 그리드의 수가 저장된다. 현재 프레임과 이전 프레임 간의 입자 정보의 차이를 확인한 후, 이전 프레임보다 입자 수가 적은 경우, 해당 그리드는 파괴로 처리된다.

[0064] 도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 트레스카 항복 기준에 따른 응력과 거리를 설명하기 위한 도면이다.

[0065] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 외부 힘이 특정 크기 이상인 경우 물체가 변형되는지 여부를 판단하기 위해 항복 조건을 활용한다. 항복 조건에 대한 전형적인 가정으로는 최대 변형 에너지 이론과 최대 전단 응력 이론이 있으며, 이는 연성 재료의 파괴에 적합하다. 또한, 최대 주응력 이론과 모어-쿨롬 이론은 취성 재료의 파괴에 적합하다.

[0066] 최대 변형 에너지 항복 조건 방정식에 따르면, 항복은 물체의 변형 에너지가 항복 에너지와 같거나 큰 경우에 발생한다. 여기서, g_e는 최대 응력, σ는 주 응력, τ는 최대 변형 에너지 항복 조건 방정식에 나타난 전단 응력이다:

[0067] $$g_e^{DE} = 1/\sqrt{2}\,[(\sigma_x-\sigma_y)^2-(\sigma_y-\sigma_z)^2-(\sigma_z-\sigma_x)^2+6(\tau_{xy}^2+\tau_{yz}^2+\tau_{zx}^2)]^{(1/2)} \ge 1 \quad (5)$$

[0068] 최대 전단 응력 이론은 물체가 받는 전단 응력이 물체의 내재된 항복 조건과 같거나 큰 경우에 파괴가 시작된다고 가정한다. 만약 σ_1이 최대 주 응력, σ_3이 최소 주 응력, S_y가 항복 강도인 경우, 최대 전단 응력 항복 조건은 식(6)에 표시된다:

[0069] $$g_e^{MSS} = (\sigma_1 - \sigma_3)/V_y \geq 1 \quad (6)$$

[0071] 우리는 트레스카 항복 조건을 활용한다. 여기서 항복은 물체에 가해지는 응력이 인장 시험의 최대 응력과 동일한 경우에 발생한다. 탄성 물체가 외부 힘에 의해 변형될 때, 트레스카 항복 조건을 기반으로 파괴의 순간을 추론한다. 파괴 과정이 진행되면 잔류물이 적용된 벡터 방향으로 방출된다.

[0072] 도 5는 트레스카 항복 조건에 따른 응력과 거리의 표현을 보여준다. 트레스카 항복 조건은 주응력과 관련되어 있으며, 응력이 물체 내부에서 발생하는 외부 힘을 의미한다. 이는 최대 및 최소 주응력의 차이의 절반으로 표현되며, 다양한 물체의 항복 조건을 나타낼 수 있다. 식(7)에 표시된 트레스카 항복 조건은 근사적으로 표현된다:

[0073] $$\tau_f = (\sigma_1 - \sigma_3)/2 \quad (7)$$

[0074] 본 발명의 실시예에 따른 항복 조건은 최대 주응력(σ_1)과 최소 주응력(σ_3)의 차이의 절반이다. 외부 힘에 의해 압력이 급격히 증가할 때, 탄성 물체는 원래 상태로 돌아가기 위해 반작용 힘을 생성한다. 물체의 내재된 항복 조건보다 적용된 외부 힘이 큰 경우에는 손실이 발생한다. 트레스카 항복 조건은 입자 기반 시뮬레이션에서 유용하다. 기존의 최대 전단 응력 이론은 각도에서 단위 면적에 가해지는 모든 힘을 계산해야 한다. 입자 기반 시뮬레이션은 입자마다 적용된 물리적 양을 기반으로 하기 때문에 더 정확하다. 입자가 물체의 구성 단위를 형성하기 때문이다. 트레스카 항복 조건은 최대와 최소 주응력을 요구한다. 제안된 방법에서는 탄성 물체가 입자로 구성되며, 적용된 힘에 따라 그 부피가 변화한다. 그 결과로, 가장 큰 힘과 가장 작은 힘에서의 부피로 근사화할 수 있다.

[0075] $$\tau_f = (|kV_{max} - kV_{min}|)/2 \quad (8)$$

[0076] 식(8)은 탄성에 대한 항복 조건 방정식으로, 여기서 V_{max}는 최대 주응력 하에서 탄성 물체의 부피 변화를 나타내고, V_{min}은 최소 주응력 하에서 입자의 부피 변화를 나타낸다. 탄성 계수인 k는 특정 물체의 탄성을 나타낸다. 입자들은 외부 힘에 따라 벡터 변화를 겪으며, 항복 조건에 도달하기 전까지 응력으로 인해 서로 간의 탄성을 유지한다. 그러나 항복 조건을 초과하는 힘에 노출되면 더 이상 응력을 견딜 수 없으므로 해당 벡터 방향으로 방출된다.

[0078] 도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른 탄성체의 균열 형성과정을 설명하기 위한 도면이다.

[0079] 본 발명의 실시예에 따른 실험은 20,000개의 입자와 128×128 크기의 그리드를 사용하여 600프레임의 시뮬레이션으로 설정되었다. 중앙 처리 장치(CPU)로는 i9-10900X를 사용하였으며, 그래픽 처리 장치(GPU)로는 RTX 3090을 사용하였다. 본 발명의 실시예에 따른 균열 감지 알고리즘을 활용하여 입자 그룹의 속도 변화에 대한 학습 데이터를 생성하고 기존 MPM과 비교하였다. 또한, 트레스카 항복 조건에 기반하여 구의 표면 또는 부피를 근사화 할 때 파괴 순간에 잔류물을 방출하는 결과를 기존 MPM 방법과 비교하였다.

[0080] 도 6은 입자로 구성된 구 탄성체가 화살표 방향으로 위에서 떨어지는 순간의 파괴를 관찰한 실험 결과를 보여준다. 도 6(a)는 MPM의 결과를 나타내고, 도 6(b)는 제안하는 탄성체 파괴 모델링 결과를 나타낸다.

[0081] 파괴 과정에서 발생하는 파괴는 물체가 받는 힘의 강도에 따라 다양한 형태를 나타낸다. 물체가 떨어지는 순간 갑작스러운 강한 힘이 발생할 때, 탄성에 의해 전달된 그 힘은 파괴가 발생하기 전에 내부적으로 처음으로 적용된다. 기존 MPM의 경우, 떨어지는 과정에서의 계산이 제대로 이루어지지 않아 초기에는 내부적으로 힘이 받아지지 않는 현상이 발생한다(610). 만약 그 힘을 받는 순간의 프레임들을 더 세분화하면, 실시간 계산은 불가능하지만 힘이 먼저 내부적으로 받아진다는 결과를 보여준다. 제안하는 방법은 다양한 떨어지는 과정의 경우를 학습한 모델과 최적화된 변형 그라디언트의 변화를 기록하여 파괴의 존재 여부를 결정한다. 따라서 충격의 세부 사항이 반영되며(620), 상단과 하단 이미지의 차이를 통해 보다 복잡한 파괴 흐름을 얻을 수 있다.

[0083] 도 7은 본 발명의 일 실시예에 따른 탄성체의 균열 및 잔류물 방출 과정을 설명하기 위한 도면이다.

[0084] 도 7는 화살표 방향으로 위에서 떨어지는 입자 기반 탄성 물체가 파괴 순간에 잔류물을 방출하는 실험 결과를 보여준다. 도 7(a)는 MPM의 결과를 나타내고, 도 7(b)는 제안하는 탄성체 파괴 모델링 결과를 나타낸다.

[0085] 기존 MPM의 경우, 물체는 Cauchy 응력을 기반으로 일정 임계 값 까지는 형태를 유지하지만 그 이상에서 파괴된다. 그러나 이는 파괴의 존재 여부만을 판단할 뿐, 물체 내부에서 축적된 힘을 정확하게 시뮬레이션 할 수 없다. 결과적으로 입자가 방출되지 않고 파괴만 발생한다(710). 이에 비해 트레스카 항복 조건 방정식을 기반으로 한 제안된 방법은 파괴가 발생할 때까지 축적된 입자들의 힘을 방출한다(720).

[0087] 도 8은 본 발명의 일 실시예에 따른 대각선 힘을 받는 탄성체의 균열 및 잔류물 방출 과정을 설명하기 위한 도면이다.

[0088] 도 8은 탄성 고체 외부와 액체 내부를 가진 물체를 기반으로 한 실험 결과를 보여준다. 도 8(a)는 MPM의 결과를 나타내고, 도 8(b)는 제안하는 탄성체 파괴 모델링 결과를 나타낸다.

[0089] 물체는 좌상에서 우하로 대각선 힘을 받아 파괴되며 잔류물이 방출된다. 기존 MPM의 경우, 액체는 파괴된 표면을 통해 유출되지만 외부 표면에 큰 영향을 주지는 않는다(810). 이에 비해 제안된 방법은 파괴 순간까지 힘을 축적한 입자들을 방출하여 외부 표면을 변형하거나 파괴한다. 과즙으로 채워진 과일이나 액체로 채워진 풍선과 같이 외부와 내부 표면이 구분된 탄성 물체가 압축되고 파괴될 때, 파괴 순간까지 힘을 경험하는 내부 물질이 외부 표면에 강력하게 밀어붙인다(820). 제안하는 방법은 이러한 현실적인 세부 사항을 시뮬레이션하기 위해 제안되었다.

[0091] 도 9는 본 발명의 일 실시예에 따른 시뮬레이션 프레임 속도를 MPM과 비교한 그래프이다.

[0092] 도 9를 참조하면, 기존 MPM에서는 탄성 물체 파괴 순간에는 파괴 발생 보정이나 잔류물 방출이 없기 때문에 최소한의 프레임 변화가 있다(그래프 상에서 3-4초 부근의 MPM). DL 기술에 기반한 데이터를 사용하여 파괴 발생을 측정하기 때문에 시뮬레이션에서 추가적인 계산이 필요하지 않으며, 안정된 프레임 속도인 60 fps에 근접한다(fracture). 항복 조건에 따른 잔류물 방출은 파괴 순간에 축적된 응력을 계산하는 것을 포함하므로 약 5 fps의 일시적인 프레임 속도 감소가 발생한다 (yield criterion). 파괴 형성과 잔류물 방출이 동시에 적용될 때, 물체의 파괴 순간에 약 5 fps의 프레임 속도 감소를 제외하고 시뮬레이션은 안정된 프레임 속도를 유지한다 (fracture+ yield criterion).

[0093] 본 발명의 실시예에 따르면, 탄성체의 파괴 과정을 학습하고 분류하기 위한 기반을 형성한다. 파괴가 확인되면 프레임을 세분화하여 계산한 변형 그라디언트가 학습된다. 결과적으로 추가적인 계산없이 실시간 렌더링을 통해 고품질의 균열과 파괴를 시뮬레이션 하는 것이 가능해진다. 또한, 트레스카 항복 조건을 활용하여 탄성 물체의 항복 조건을 근사화 한다. 이를 통해 방출 순간의 힘을 더 자세하게 시뮬레이션 할 수 있다.

[0095] 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.

[0096] 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, 가상 장치(virtual equipment), 컴퓨터 저장 매체 또는 장치에 구체화(embody)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.

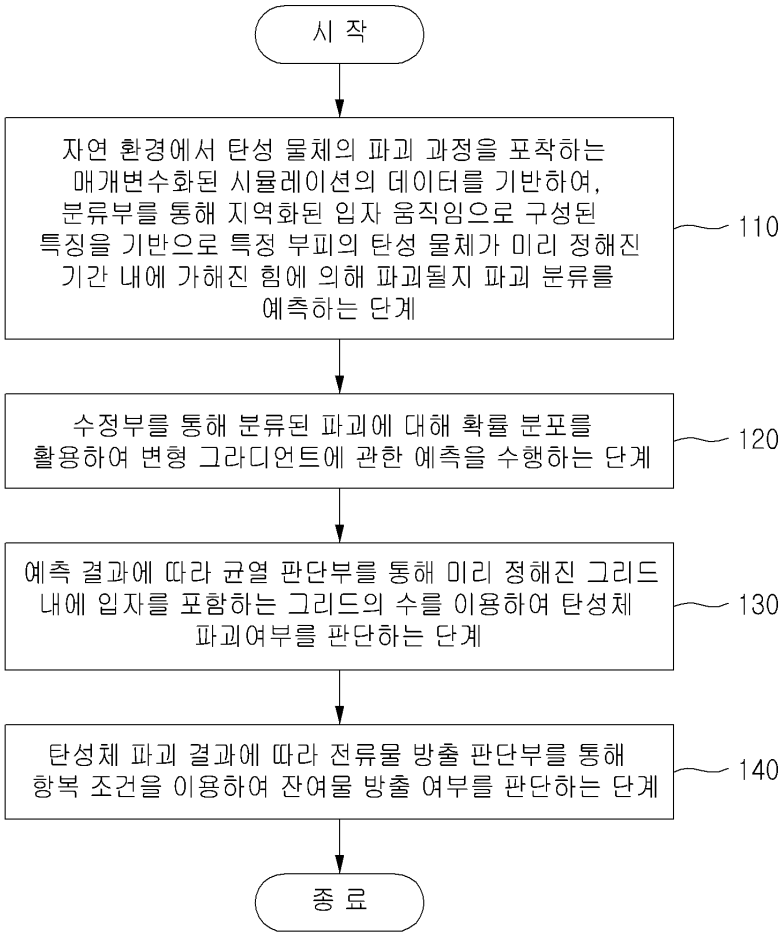
[0097] 실시예에 따른 방법은 다양한 컴퓨터 수단을 통하여 수행될 수 있는 프로그램 명령 형태로 구현되어 컴퓨터 판독 가능 매체에 기록될 수 있다. 상기 컴퓨터 판독 가능 매체는 프로그램 명령, 데이터 파일, 데이터 구조 등을 단독으로 또는 조합하여 포함할 수 있다. 상기 매체에 기록되는 프로그램 명령은 실시예를 위하여 특별히 설계되고 구성된 것들이거나 컴퓨터 소프트웨어 당업자에게 공지되어 사용 가능한 것일 수도 있다. 컴퓨터 판독 가능 기록 매체의 예에는 하드 디스크, 플로피 디스크 및 자기 테이프와 같은 자기 매체(magnetic 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.

[0098] 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.

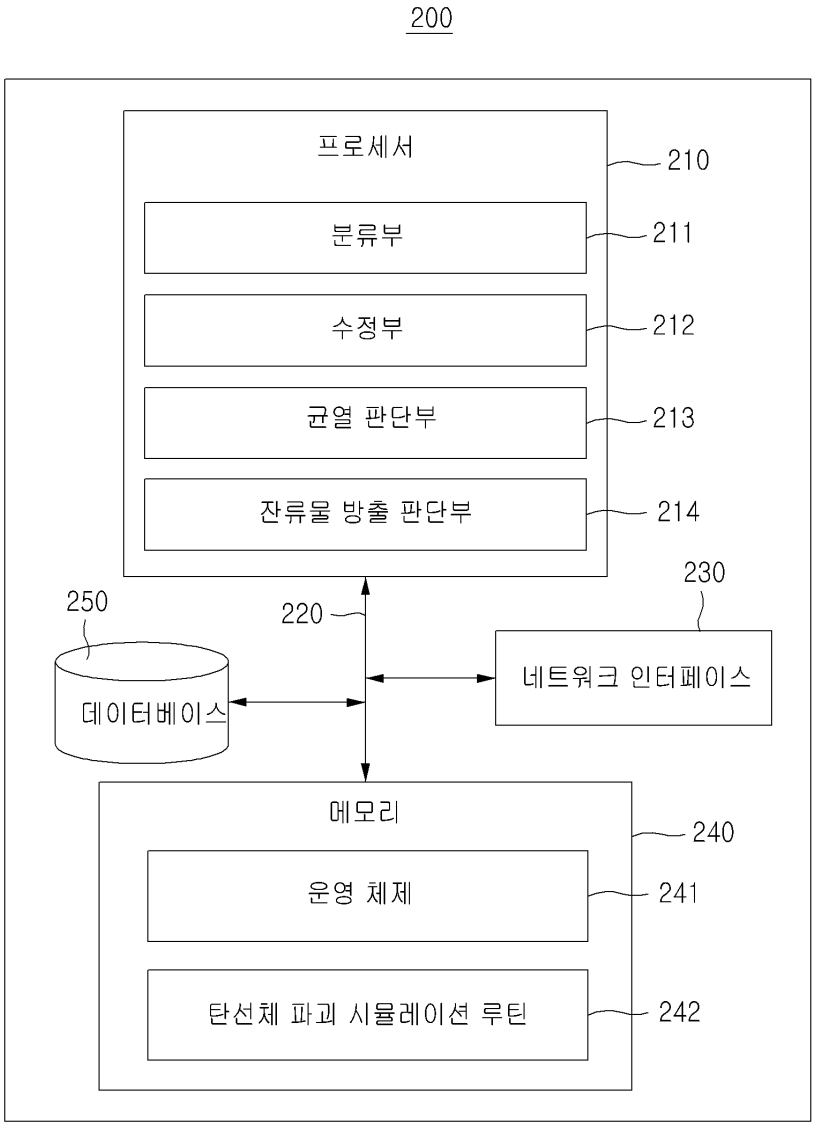
[0099] 그러므로, 다른 구현들, 다른 실시예들 및 특허청구범위와 균등한 것들도 후술하는 특허청구범위의 범위에 속한다.

도면

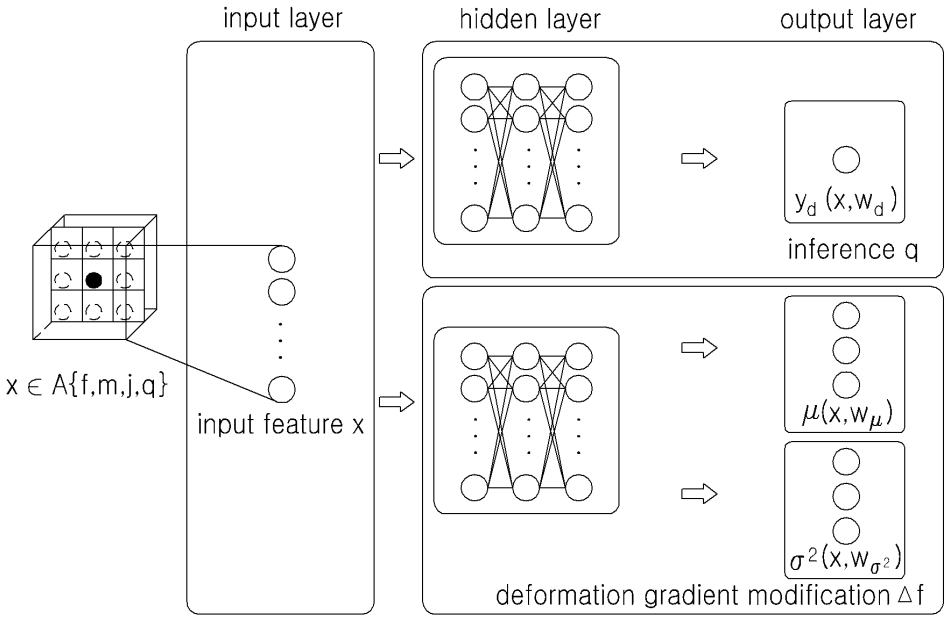
도면1


시 작
자연 환경에서 탄성 물체의 파괴 과정을 포착하는 매개변수화된 시뮬레이션의 데이터를 기반하여, 분류부를 통해 지역화된 입자 움직임으로 구성된 특징을 기반으로 특정 부피의 탄성 물체가 미리 정해진 기간 내에 가해진 힘에 의해 파괴될지 파괴 분류를 예측하는 단계
110
수정부를 통해 분류된 파괴에 대해 확률 분포를 활용하여 변형 그라디언트에 관한 예측을 수행하는 단계
120
예측 결과에 따라 균열 판단부를 통해 미리 정해진 그리드 내에 입자를 포함하는 그리드의 수를 이용하여 탄성체 파괴여부를 판단하는 단계
130
탄성체 파괴 결과에 따라 전류물 방출 판단부를 통해 항복 조건을 이용하여 잔여물 방출 여부를 판단하는 단계
140
종 료

도면2


200
프로세서
210
분류부
211
수정부
212
균열 판단부
213
잔류물 방출 판단부
214
230
250
220
네트워크 인터페이스
데이터베이스
메모리
240
운영 체제
241
탄선체 파괴 시뮬레이션 루틴
242

도면3

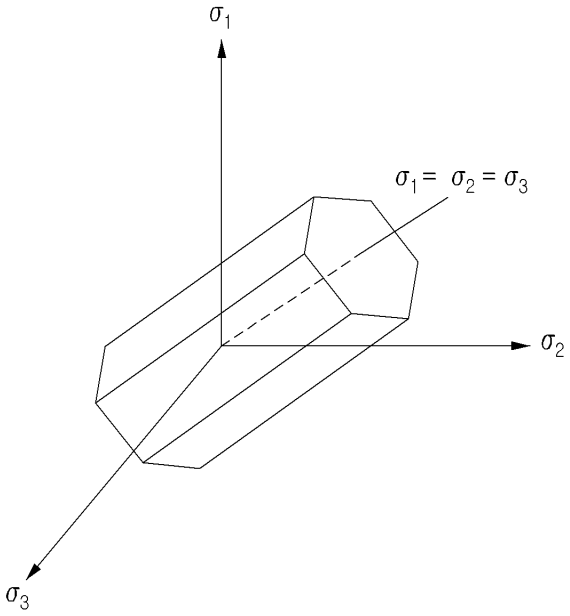


도면4

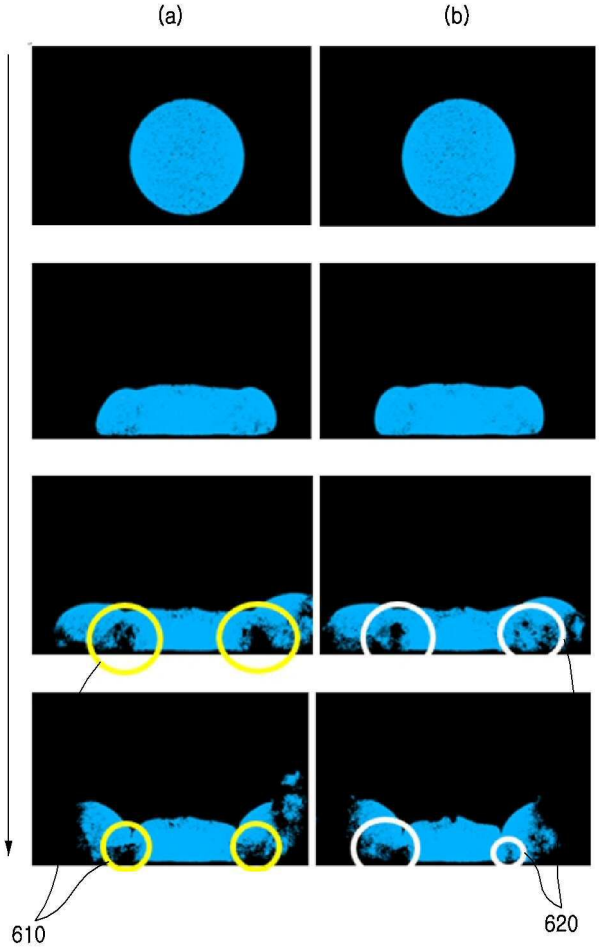
Algorithm 1: Fracture determination

```
1: procedure searchFracture():
2:     Init grid G, particle P
3:     for each G:
4:         checkParticleCount(Pt)
5:         if G include min fracture
6:           Fracture == G
7:     end for
8:     for each P:
9:         if Pt < Pt-1
10:          T ← Fracture
11:    end for
12: end procedure
```

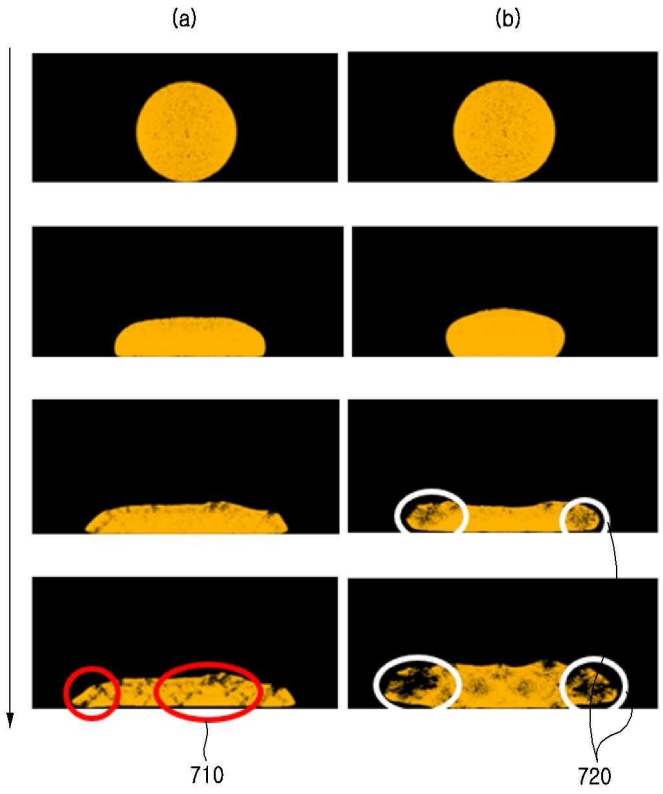
도면5



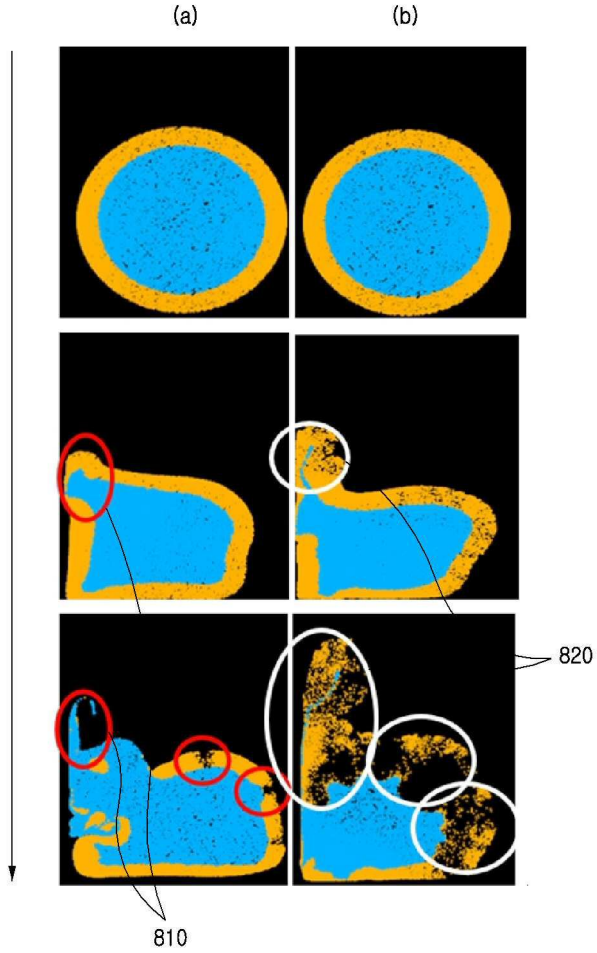
도면6



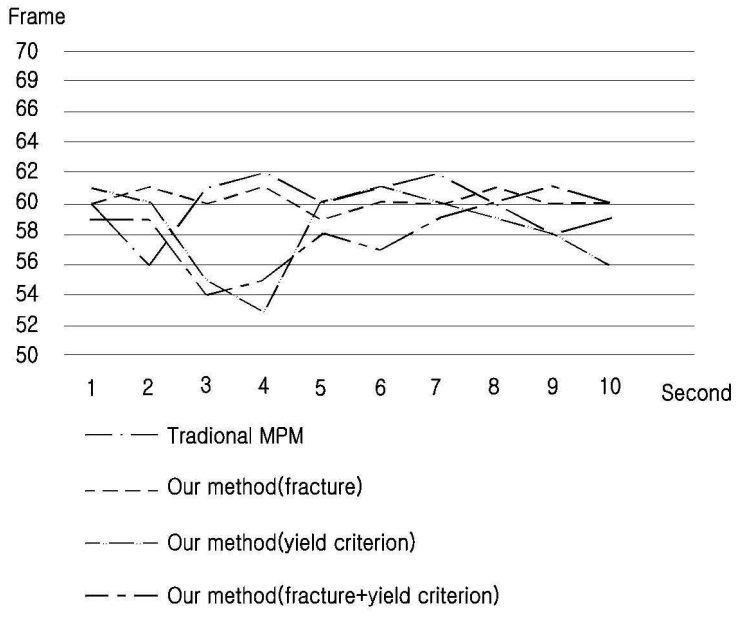
도면7



도면8


(a)
(b)
820
810

도면9


Frame
70
69
66
64
62
60
58
56
54
52
50
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
Second
Tradional MPM
Our method(fracture)
Our method(yield criterion)
Our method(fracture+yield criterion)