(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2016년04월19일
(11) 등록번호 10-1613178
(24) 등록일자 2016년04월11일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G06T 17/00 (2006.01) *G06T 17/20* (2006.01)
(52) CPC특허분류
G06T 17/00 (2013.01)
G06T 17/20 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2015-0027600
(22) 출원일자 2015년02월26일
심사청구일자 2015년02월26일
(56) 선행기술조사문헌
modeling of rock form taking into account growing process of columnar joints, The Society for Art and Science Vol.3(2008)
A Procedural Approach to Authoring Solid Models, ACM Transactions on Graphics (TOG) Proceedings (2002)
큐브의 단면을 이용한 기하학적인 물체의 복셀화, 정보처리학회논문지. The KIPS transactions. Part A. Part A 저널 지식맵 v.10A no.2(2003)
기후지형학적 관점에서 석조문화재의 풍화양상 비교 연구, 이화여자대학교 사회과학 석사논문(2013)

(73) 특허권자
한밭대학교 산학협력단
대전광역시 유성구 동서대로 125 (덕명동)
(72) 발명자
안은영
대전광역시 유성구 봉명로 48, 802동 903호 (원신흥동, 신안인스빌리베라)
이수열
대전광역시 동구 옥천로 38, 105동 2202호 (신흥동, 신흥마을아파트)
(74) 대리인
특허법인 웰

전체 청구항 수 : 총 7 항 심사관 : 이병우

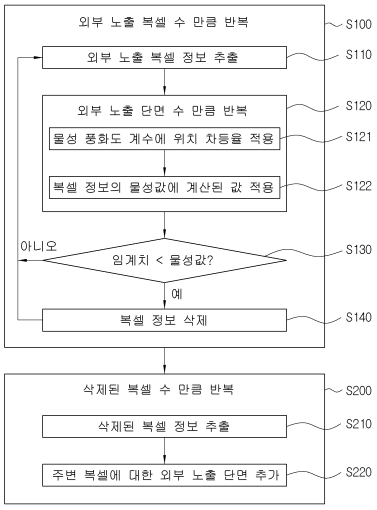
(54) 발명의 명칭 **복셀 구조를 이용한 석재의 물성변화 추정 및 입상붕괴 가시화 방법**

(57) 요 약

암석의 입상붕괴에 의한 박리현상을 가시화하기 위해 시간의 경과에 의한 암석의 물리적 특성 변화를 수학적으로 모델링하여 3차원으로 시각화하는 복셀 구조를 이용한 입상붕괴 가시화 방법에 관한 것으로, (a) 암석의 입자를 육면체 형태의 복셀로 표현하고, 외부 노출 단면 개수가 1개 이상인 복셀을 추출하는 단계, (b) 상기 단계 (a)에

(뒷면에 계속)

대 표 도 - 도12



서 추출된 각각의 복셀에 대해 외부에 노출된 단면의 방향에 따라 가중치를 차등 적용하는 단계, (c) 상기 단계 (a)에서 추출된 복셀들에 대해서 초기 공극률 및 입상붕괴 임계치를 자동으로 부여하여 계산하는 단계, (d) 상기 단계 (c)에서의 계산 결과, 복셀의 계산된 공극률이 입상붕괴 임계치보다 크면 입상붕괴가 이루어진 것으로 판단하여 해당 복셀을 삭제하는 단계, (e) 계산이 수행되는 동안 입상붕괴로 삭제되는 복셀이 발생하면 주변 복셀에 대해 외부 노출 여부를 판단하는 단계를 포함하는 구성을 마련하여, 다양한 석재로 제작된 석조물의 풍화 현상에 의한 박리 현상을 효과적으로 가시화할 수 있다.

이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 2010-0021154
부처명 교육부
연구관리전문기관 한국연구재단(교육부)
연구사업명 일반연구자지원사업
연구과제명 가상문화유산의 디지털 유물의 노후화 현상 가시화를 위한에이징 시뮬레이터 개발
기 여 율 1/2
주관기관 연구사업지원팀
연구기간 2014.09.01 ~ 2015.08.31
이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 C0193890
부처명 중소기업청
연구관리전문기관 한국산학연협회
연구사업명 기업부설연구소지원사업
연구과제명 소형항공기 비행훈련장치 핵심 기술 개발
기 여 율 1/2
주관기관 중소기업청
연구기간 2014.07.01 ~ 2016.06.30
공지예외적용 : 있음

명 세 서

청구범위

청구항 1

암석의 동결-융해 작용에 의한 입상붕괴에 의한 박리현상을 가시화하는 방법으로서,

(a) 암석의 입자를 육면체 형태의 복셀로 표현하고, 외부 노출 단면 개수가 1개 이상인 복셀을 추출하는 단계,

(b) 상기 단계 (a)에서 추출된 각각의 복셀에 대해 외부에 노출된 단면의 방향에 따라 가중치를 차등 적용하는 단계,

(c) 상기 단계 (a)에서 추출된 복셀들에 대해서 초기 공극률 및 입상붕괴 임계치를 자동으로 부여하는 단계,

(d) 상기 단계 (c)에서의 계산 결과, 복셀의 계산된 공극률이 입상붕괴 임계치보다 크면 입상붕괴가 이루어진 것으로 판단하여 해당 복셀을 삭제하는 단계,

(e) 계산이 수행되는 동안 입상붕괴로 삭제되는 복셀이 발생하면 주변 복셀에 대해 외부 노출 여부를 판단하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 복셀 구조를 이용한 입상붕괴 가시화 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

(f) 상기 단계 (d)에서 삭제된 복셀 정보를 추출하는 단계,

(g) 삭제된 복셀의 주변 복셀에 대해 외부 노출 단면을 추가하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 복셀 구조를 이용한 입상붕괴 가시화 방법.

청구항 3

제2항에 있어서,

외부 노출 단면이 있는 복셀에 대한 상기 단계 (a) 내지 (g)의 전체 계산은 1 순환주기마다 반복 수행되고, 물성 변화 처리인 상기 단계 (a) 내지 (e)와 노출 단면 처리인 상기 단계 (f) 내지 (g)는 독립적으로 수행되는 것을 특징으로 하는 복셀 구조를 이용한 입상붕괴 가시화 방법.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 단계 (a)에서 복셀화 계산 시에 추출되는 복셀 정보를 바이너리 파일로 저장하고, 저장된 바이너리 파일에 따른 복셀화 계산 시에 다중 스레드(Multi-Thread)를 이용하여 병렬로 처리하는 것을 특징으로 하는 복셀 구조를 이용한 입상붕괴 가시화 방법.

청구항 5

제4항에 있어서,

상기 다중 스레드에서 사용되는 스레드 수에 대응하여 초기화된 바이너리 파일을 생성하고, 상기 스레드 수에 대응하는 계산 영역을 분할하여 각 영역의 복셀화 계산 시에 연동된 바이너리 파일을 사용하는 것을 특징으로 하는 복셀 구조를 이용한 입상붕괴 가시화 방법.

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 각 영역의 표면 복셀화의 계산 시에 각 스레드에서는 3차원 모델의 폴리곤 정보를 읽어들여 자신의 계산 영역의 폴리곤 정보인지 판별 후 표면 복셀화 작업을 수행하며, 교차 판별된 복셀 정보는 연동된 바이너리 파일

에 적용하는 것을 특징으로 하는 복셀 구조를 이용한 입상붕괴 가시화 방법.

청구항 7

제1항에 있어서,

가중치를 차등 적용한 공극률의 변화는 하기 식 (6)

$$P_N = P_{init} + \sum_{n=1}^{N}\sum_{s=1}^{E} A \times \alpha_{rate} \quad \cdots \text{식(6)}$$

(여기서, N은 동결-융해 횟수, A는 공극률의 물성변화 계수, P_{init}는 초기 공극률을 의미하고, P_N은 동결-융해 사이클에 N번 노출된 이후의 변화된 공극률, E는 외부에 노출된 단면의 개수, α_{rate}은 외부 노출 단면의 위치에 따른 차등률)에 의해 계산되는 것을 특징으로 하는 복셀 구조를 이용한 입상붕괴 가시화 방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 복셀 구조를 이용한 석재의 물성변화 추정 및 입상붕괴 가시화 방법에 관한 것으로, 특히 암석의 입상붕괴에 의한 박리현상을 가시화하기 위해 시간의 경과에 의한 암석의 물리적 특성 변화를 수학적으로 모델링하여 3차원으로 시각화하는 복셀 구조를 이용한 입상붕괴 가시화 방법에 관한 것이다.

[0002]

배 경 기 술

[0003] 최근 기상이변 및 이상기후의 영향으로 국지적인 집중호우 같은 예상치 못한 재난재해가 빈번하게 발생하고 있다. 이로 인하여 토목구조물 붕괴와 그로 인한 인명피해가 증가하는 추세이고, 특히 사면붕괴로 인한 피해는 더욱 증가하는 추세이다.

[0004] 특히 암반사면의 경우에는 토사사면과는 달리 암석의 풍화 정도나 불연속면의 특성 등에 의해 다양하고 복잡한 형태의 파괴 형태를 가지게 되며, 사면에 내재된 구조적 결함은 암반의 강도를 저하시키고 굴착면에 대해서 특정방향으로 응력을 집중시키는 결과를 가져와 사면의 안정성을 떨어뜨리게 되므로 사면안정해석을 통해 구조적 결함을 미연에 분석하는 것이 중요하다.

[0005] 사면안정해석을 포함한 지반공학적인 문제에는 자연물을 대상으로 하는 만큼 불확실이 포함되고, 이러한 불확실 요소들은 해석과정 및 결과에 대한 신뢰성을 저하시킨다. 따라서 이러한 불확실성을 해석모델에 고려함으로써 해석모델 자체의 합리성 확보는 물론, 효율적인 설계나 경제성 분석을 도모하고자 하는 노력들이 진행중이다.

[0006] 일 예로서, 침식 과정을 다양한 형태로 모델링(modeling)하는 시뮬레이션 기반의 지형 생성 기법이 알려져 있다. 이 기법은 수량 이동에 의한 토양 변형을 산출하기 위하여 지형이 정의된 공간을 격자 형태로 분할하고, 각 격자점에서 물의 움직임과 토양의 이동을 산출한다. 그러나, 이 기법은 시뮬레이션의 사실성과 안정성을 확보하기 위하여 침식 과정을 미세한 타임스텝(time step)으로 분할하여 반복 수행하게 되며, 이 과정에서 매우 오랜 시간이 소요되는 문제가 있다.

[0007] 한편, 석조물을 구성하는 암석의 특성에는 중량, 비중, 공극률, 함수율, 흡수율 등의 기본적인 물리적 성질과 압축강도, 인장강도, 탄성계수 등의 강도나 변형에 관한 역학적 성질이 포함된다. 이러한 암석의 물리적 또는 역학적 성질은 서로 상관관계를 가지고 있으며 풍화과정에서 특성의 변화가 발생한다. 암석의 풍화작용에 관련된 연구는 상술한 바와 같이, 대부분 외부 환경에 따라 암석의 풍화 진행 정도를 알아보는 것에 중점을 두고 있다.

[0008] 이러한 기술의 일 예가 하기 문헌 1 및 2 등에 개시되어 있다.

[0009] 예를 들어, 하기 특허문헌 1에는 지상라이다를 이용하여 측정한 사면 표면에 대한 점군자료로부터 사면 연장,

높이, 방위, 경사 등의 기하학적 조건과 불연속면의 프로파일(profile)을 산출하고, 절리면의 벽면강도를 간접적으로 얻을 수 있도록 불연속면에 대한 SHV(Schmidt Hammer Valve)를 측정하고, 측정된 SHV를 이용하여 JCS(Joint Compressive Strength)를 산출하고, 불연속면의 프로파일을 이용하여 정량적인 JRC(Joint Roughness Coefficient)를 산출하고, 산출된 JCS 및 JRC를 확률변수로 이용하여 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation)을 시행하여 확률밀도함수(PDF;Probabilistic Density Function) 및 누적밀도함수(CDF;Cumulative Density Function)를 구하고 불안정영역 경계의 확률값으로부터 파괴확률을 산정하는 과정을 포함하는 지상라이다를 이용한 확률론적 암반사면 안정해석방법에 대해 개시되어 있다.

[0010] 또 하기 특허문헌 2에는 원시 지형 모델(model)을 미리 정의된 기준에 따라 복수의 부분 지형 구역으로 분할하는 단계, 상기 복수의 부분 지형 구역을 다중 프로세서(multi processor)에 할당하는 단계 및 상기 다중 프로세서 기반의 병렬 처리를 통해, 상기 복수의 부분 지형 구역에 대한 지형 변형 시뮬레이션(simulation)을 수행하여 최종 지형 모델을 생성하는 단계를 포함하고, 폴리곤(polygon) 단위로 지형 유사도를 비교하여 예제 지형 모델을 획득하는 지형 모델의 생성 방법에 대해 개시되어 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0011] (특허문헌 0001) 대한민국 등록특허공보 제10-1009657호(2011.01.13 등록)

(특허문헌 0002) 대한민국 공개특허공보 제2014-0139194호(2014.12.05 공개)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0012] 그러나, 상술한 바와 같은 종래의 기술에서는 풍화진행 정도, 예를 들어 암석의 물리적, 역학적 성질을 파악하기 위해 일정한 시료가 필요하지만, 시료를 채취할 수 없는 문화재급 석조물에서는 활용할 수가 없기 때문에 석조물에서 박리된 것으로 추정되는 동일한 암석시료를 이용하거나 육안관찰이나 초음파검사 등의 비파괴적인 방법을 통해 유추할 수밖에 없다는 문제가 있었다.

[0013] 또 상기와 같은 종래의 기술에서의 복셀화 연구는 대부분 복셀화 방법 및 복셀화 처리 시간에 중점을 두고 있으므로, 고해상도의 복셀화 수행 시에는 해상도가 높아짐에 따라 계산량 및 처리시간의 증가와 함께 산출된 데이터를 갖는 메모리 사용량의 증가로 인해 저사양의 컴퓨터에서 고해상도의 복셀화 수행이 어렵다는 문제가 있었다.

[0014] 또한 저해상도 복셀화 및 고밀도의 폴리곤 모델의 복셀화 수행 시에는 객체를 구성하는 폴리곤들 간의 간격보다 복셀의 크기가 큰 경우, 입체 복셀화 수행 시에 영역 채우기 오류가 발생한다는 문제도 있었다.

[0015] 본 발명의 목적은 상술한 바와 같은 문제점을 해결하기 위해 이루어진 것으로서, 복셀 기법을 적용하여 석조물의 풍화진행 정도를 3차원으로 시각화하여 가시화할 수 있는 복셀 구조를 이용한 입상붕괴 가시화 방법을 제공하는 것이다.

[0016] 즉, 본 발명에서는 동결-융해 작용에 의한 화강암의 공극률에 대한 변화 함수를 도출하여 사용함으로써 입상붕괴에 의한 석조물의 박리에 의한 풍화 과정을 시뮬레이션을 통해 가시화하는 것이다.

[0017] 본 발명의 다른 목적은 복셀화 과정에서 계산 시간을 단축하고, 메모리 사용량을 최소화하는 복셀 구조를 이용한 입상붕괴 가시화 방법을 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0018] 상기 목적을 달성하기 위해 본 발명에 따른 복셀 구조를 이용한 입상붕괴 가시화 방법은 암석의 동결-융해 작용

에 의한 입상붕괴에 의한 박리현상을 가시화하는 방법으로서, (a) 암석의 입자를 육면체 형태의 복셀로 표현하고, 외부 노출 단면 개수가 1개 이상인 복셀을 추출하는 단계, (b) 상기 단계 (a)에서 추출된 각각의 복셀에 대해 외부에 노출된 단면의 방향에 따라 가중치를 차등 적용하는 단계, (c) 상기 단계 (a)에서 추출된 복셀들에 대해서 초기 공극률 및 입상붕괴 임계치를 자동으로 부여하는 단계, (d) 상기 단계 (c)에서의 계산 결과, 복셀의 계산된 공극률이 입상붕괴 임계치보다 크면 입상붕괴가 이루어진 것으로 판단하여 해당 복셀을 삭제하는 단계, (e) 계산이 수행되는 동안 입상붕괴로 삭제되는 복셀이 발생하면 주변 복셀에 대해 외부 노출 여부를 판단하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 한다.

[0019] 또 본 발명에 따른 복셀 구조를 이용한 입상붕괴 가시화 방법에 있어서, (f) 상기 단계 (d)에서 삭제된 복셀 정보를 추출하는 단계, (g) 삭제된 복셀의 주변 복셀에 대해 외부 노출 단면을 추가하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 한다.

[0020] 또 본 발명에 따른 복셀 구조를 이용한 입상붕괴 가시화 방법에 있어서, 외부 노출 단면이 있는 복셀에 대한 상기 단계 (a) 내지 (g)의 전체 계산은 1 순환주기마다 반복 수행되고, 물성 변화 처리인 상기 단계 (a) 내지 (e)와 노출 단면 처리인 상기 단계 (f) 내지 (g)는 독립적으로 수행되는 것을 특징으로 한다.

[0021] 또 본 발명에 따른 복셀 구조를 이용한 입상붕괴 가시화 방법에 있어서, 상기 단계 (a)에서 복셀화 계산 시에 추출되는 복셀 정보를 바이너리 파일로 저장하고, 저장된 바이너리 파일에 따른 복셀화 계산 시에 다중 스레드(Multi-Thread)를 이용하여 병렬로 처리하는 것을 특징으로 한다.

[0022] 또 본 발명에 따른 복셀 구조를 이용한 입상붕괴 가시화 방법에 있어서, 상기 다중 스레드에서 사용되는 스레드 수에 대응하여 초기화된 바이너리 파일을 생성하고, 상기 스레드 수에 대응하는 계산 영역을 분할하여 각 영역의 복셀화 계산 시에 연동된 바이너리 파일을 사용하는 것을 특징으로 한다.

[0023] 또 본 발명에 따른 복셀 구조를 이용한 입상붕괴 가시화 방법에 있어서, 상기 각 영역의 표면 복셀화의 계산 시에 각 스레드에서는 3차원 모델의 폴리곤 정보를 읽어 들여 자신의 계산 영역의 폴리곤 정보인지 판별 후 표면 복셀화 작업을 수행하며, 교차 판별된 복셀 정보는 연동된 바이너리 파일에 적용하는 것을 특징으로 한다.

[0024] 또 본 발명에 따른 복셀 구조를 이용한 입상붕괴 가시화 방법에 있어서, 가중치를 차등 적용한 공극률의 변화는 하기 식 (6)

[0025] $$P_N = P_{init} + \sum_{n=1}^{N}\sum_{s=1}^{E} A \times \alpha_{rate} \quad \cdots \text{식(6)}$$

[0026] (여기서, N은 동결-융해 횟수, A는 공극률의 물성변화 계수, P_{init}는 초기 공극률을 의미하고, P_N은 동결-융해 사이클에 N번 노출된 이후의 변화된 공극률, E는 외부에 노출된 단면의 개수, α_{rate}은 외부 노출 단면의 위치에 따른 차등률)에 의해 계산되는 것을 특징으로 한다.

발명의 효과

[0027] 상술한 바와 같이, 본 발명에 따른 복셀 구조를 이용한 석재의 물성변화 추정 및 입상붕괴 가시화 방법에 의하면, 석조물의 입상붕괴를 가시화할 수 있는 시뮬레이터를 구현하므로, 다양한 석재로 제작된 석조물의 풍화 현상에 의한 박리 현상을 효과적으로 가시화할 수 있다는 효과가 얻어진다.

[0028] 또, 본 발명에 따른 복셀 구조를 이용한 석재의 물성변화 추정 및 입상붕괴 가시화 방법에 의하면, 암석의 입자를 가시화 및 물성계산에 사용하기 위해 복셀 기법을 사용하였으며 작은 입자를 표현하기 위해 고해상도 복셀화를 수행하고, 이를 위해 복셀화 수행 시에 메모리 사용량을 증가시키는 복셀 데이터를 바이너리 파일 형태로 저장하여 사용하고 다중 스레드를 이용한 병렬 처리를 적용하여 처리시간을 단축시킬 수 있다는 효과도 얻어진다.

[0029] 또, 본 발명에 따른 복셀 구조를 이용한 석재의 물성변화 추정 및 입상붕괴 가시화 방법에 의하면, 화강암에 대한 인공풍화(동결-융해 작용) 실험 자료들을 분석하여 암석의 입상붕괴를 일으키는 주요 요인을 매개변수로 하는 물성변화 함수를 정의하고, 물성변화 함수는 석조물의 형태 및 위치에 따라 물성 변화율을 차등 적용함으로써 석조물의 풍화현상을 보다 정확하게 모사 할 수 있다는 효과도 얻어진다.

도면의 간단한 설명

[0030] 도 1은 삼각형과 육면체의 교차에 따라 표면 복셀을 추출하는 과정을 설명하기 위한 도면,

도 2는 3차원 모델의 단면에 대해 내부 복셀화 과정에서의 문제점을 제시하는 도면,

도 3은 본 발명에 따른 객체의 복셀화 방법에 적용되는 파일 처리의 과정을 나타내는 도면,

도 4는 표면과 내부 복셀화 계산 시에 분할되어 사용된 바이너리 파일을 하나의 파일로 병합하는 형태를 나타내는 도면,

도 5는 본 발명에 따른 객체의 복셀화 방법에 적용되는 병렬 처리의 과정을 나타내는 도면,

도 6은 본 발명에 따른 병렬 처리에 의해 저장되는 파일의 형태를 나타내는 도면,

도 7은 복셀화 수행 전후의 모델의 일 예를 나타낸 도면,

도 8은 본 발명에 적용되는 초기 공극률을 나타내는 그래프,

도 9는 본 발명에 적용되는 입상붕괴 임계치 그래프,

도 10은 복셀의 외부 노출 단면을 나타내는 도면,

도 11은 복셀 삭제에 의한 주변 복셀의 추가 외부 노출 방향을 나타내는 도면,

도 12는 본 발명에 따른 입상붕괴 시뮬레이션 진행 순서도,

도 13은 본 발명에 따른 복셀화 결과 확인 프로그램을 나타내는 도면,

도 14는 본 발명에 따른 입상붕괴 시뮬레이션 프로그램을 나타내는 도면,

도 15는 표 1에서 m23 모델의 폴리곤 형태를 나타내는 도면,

도 16은 표 1에서 m110 모델의 폴리곤 형태를 나타내는 도면,

도 17은 표 1에서 m329 모델의 폴리곤 형태를 나타내는 도면,

도 18은 표 1에서 m374 모델의 폴리곤 형태를 나타내는 도면,

도 19는 표 1에서 m1601 모델의 폴리곤 형태를 나타내는 도면

도 20은 m23 모델의 표면 복셀화 결과를 2차원 그래프 형식으로 각 축의 중심 단면을 나타낸 도면,

도 21은 m23 모델의 입체 복셀화 결과를 2차원 그래프 형식으로 각 축의 중심 단면을 나타낸 도면,

도 22는 m110 모델의 표면 복셀화 결과를 2차원 그래프 형식으로 각 축의 중심 단면을 나타낸 도면,

도 23은 m110 모델의 입체 복셀화 결과를 2차원 그래프 형식으로 각 축의 중심 단면을 나타낸 도면,

도 24는 m329 모델의 표면 복셀화 결과를 2차원 그래프 형식으로 각 축의 중심 단면을 나타낸 도면,

도 25는 m329 모델의 입체 복셀화 결과를 2차원 그래프 형식으로 각 축의 중심 단면을 나타낸 도면,

도 26은 m374 모델의 표면 복셀화 결과를 2차원 그래프 형식으로 각 축의 중심 단면을 나타낸 도면,

도 27은 m374 모델의 입체 복셀화 결과를 2차원 그래프 형식으로 각 축의 중심 단면을 나타낸 도면,

도 28은 m1601 모델의 표면 복셀화 결과를 2차원 그래프 형식으로 각 축의 중심 단면을 나타낸 도면,

도 29는 m1601 모델의 입체 복셀화 결과를 2차원 그래프 형식으로 각 축의 중심 단면을 나타낸 도면,

도 30은 시험 환경에서 구현된 프로그램을 이용하여 복셀화 수행시의 CPU 및 메모리 사용 현황을 나타낸 도면,

도 31은 외부 노출 단면 색상표를 나타낸 도면,

도 32는 m32 모델의 표면 복셀의 외부 노출 단면 산출 결과를 복셀 객체에 색상표를 적용하여 각 축별로 가시화한 모습을 나타낸 도면,

도 33은 m110 모델의 표면 복셀의 외부 노출 단면 산출 결과를 복셀 객체에 색상표를 적용하여 각 축별로 가시

화한 모습을 나타낸 도면,

도 34는 m329 모델의 표면 복셀의 외부 노출 단면 산출 결과를 복셀 객체에 색상표를 적용하여 각 축별로 가시화한 모습을 나타낸 도면,

도 35는 m374 모델의 표면 복셀의 외부 노출 단면 산출 결과를 복셀 객체에 색상표를 적용하여 각 축별로 가시화한 모습을 나타낸 도면,

도 36은 m1601 모델의 표면 복셀의 외부 노출 단면 산출 결과를 복셀 객체에 색상표를 적용하여 각 축별로 가시화한 모습을 나타낸 도면,

도 37은 공극률 값에 대한 색상표를 나타낸 도면,

도 38은 m32 모델의 입상붕괴 시뮬레이션 결과를 복셀 객체에 색상표를 적용하여 각 주기별로 가시화한 모습을 나타낸 도면,

도 39는 m110 모델의 입상붕괴 시뮬레이션 결과를 복셀 객체에 색상표를 적용하여 각 주기별로 가시화한 모습을 나타낸 도면,

도 40은 m329 모델의 입상붕괴 시뮬레이션 결과를 복셀 객체에 색상표를 적용하여 각 주기별로 가시화한 모습을 나타낸 도면,

도 41은 m374 모델의 입상붕괴 시뮬레이션 결과를 복셀 객체에 색상표를 적용하여 각 주기별로 가시화한 모습을 나타낸 도면,

도 42는 m1601 모델의 입상붕괴 시뮬레이션 결과를 복셀 객체에 색상표를 적용하여 각 주기별로 가시화한 모습을 나타낸 도면,

도 43은 돌출된 부분의 박리 형태를 나타내는 도면,

도 44는 상하 위치에 따른 박리 형태를 나타내는 도면,

도 45는 홈이 파인 부분의 박리 형태를 나타내는 도면,

도 46은 시뮬레이션 주기별로 입상붕괴에 의한 박리로 삭제된 복셀의 수를 나타낸 그래프,

도 47은 최초 시뮬레이션 수행 시의 계산되는 복셀 개수에 대한 주기별로 계산되는 복셀 수를 백분율로 나타낸 그래프.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0031] 본 발명의 상기 및 그 밖의 목적과 새로운 특징은 본 명세서의 기술 및 첨부 도면에 의해 더욱 명확하게 될 것이다.

[0032] 먼저 본 발명의 기본 개념에 대해 설명한다.

[0033] 본 발명에서는 암석, 특히 석조물의 풍화에 가장 큰 영향을 미치는 입상붕괴에 영향을 미치는 매개변수와 입자의 물성변화에 대한 함수를 정의한다.

[0034] 암석의 물성변화를 시뮬레이션하기 위한 방법으로는 동결-융해 작용에 의한 화강암의 공극률 변화를 함수로 도출하여 적용하였다. 대한민국과 같이, 사계절이 뚜렷한 기후 환경에서는 겨울철 동결-융해 작용으로 인한 풍화가 암석에 미치는 영향이 가장 큰 것으로 보고되고 있다

[0035] 본 발명에서는 입상붕괴에 의한 암석 입자의 박리 현상을 3차원으로 가시화하기 위해 폴리곤으로 구성된 3차원 모델을 복셀화하여 사용한다. 또한 시뮬레이션 시에는 외부로 노출된 복셀만을 대상으로 물성변화를 계산함으로써 계산의 효율을 높인다. 예측할 수 없는 자연환경에서의 물성변화를 적용하기 위해 확률 변수를 적용한다. 복셀의 노출 단면의 방향에 따라 물성변환 가중치를 차등 적용하여 복셀의 노출 위치에 따라 물성변화가 다르게 일어나도록 함으로써 암석의 풍화현상을 보다 자연스럽게 표현한다.

[0036] 암석의 입상붕괴는 외부에서부터 서서히 일어나기 때문에 외부에 노출된 암석 입자에 대해서 공극률 변화 식을 이용하여 입상붕괴 과정을 시뮬레이션한다. 암석 알갱이의 표면이 외부로 많이 노출될수록 입상붕괴는 빠르게 일어난다. 이러한 자연현상을 시뮬레이션 하기 위해 암석을 구성하는 입자에 해당하는 복셀에 대해 외부 노출 단면의 개수를 고려한다. 즉, 각 복셀은 외부 노출 단면의 수만큼 공극률 변화 계산을 수행함으로써 공극률 변

화에 의한 입상붕괴가 가속화되도록 한다. 외부에 노출된 석조물은 모든 부분에 대해 함수율이 같을 수 없다. 이러한 현상을 시뮬레이션 하기 위해, 각 복셀에 대해 외부에 노출된 단면의 방향에 따라 가중치를 차등 적용한다. 즉, 상단, 측면, 하단 순서로 각 단면에 대한 함수율을 차등 적용한다.

[0037] 구체적으로 본 발명에서는 석조물의 입상붕괴에 의한 박리현상을 가시화하기 위한 방안을 제시한다. 이를 위해, 시간의 경과에 의한 암석의 물리적 특성 변화를 수학적으로 모델링하고 암석의 풍화현상을 복셀 기법을 이용하여 3차원으로 시각화 한다. 석조물의 풍화에 가장 큰 영향을 미치는 입상붕괴에 관련된 기존의 연구 결과들을 분석하여 암석의 입상붕괴에 영향을 미치는 매개변수와 입자의 물성변화에 대한 함수를 정의한다. 입상붕괴에 의한 암석 입자의 박리 현상을 3차원으로 가시화하기 위해 폴리곤으로 구성된 3차원 모델을 복셀화하여 사용한다. 암석의 입자를 표현하기 위한 고해상도 복셀화 수행 시에는 파일 처리를 통해 컴퓨터의 메모리 사용량 줄이고, 병렬 처리를 통해 계산 시간을 단축시킨다. 또한 시뮬레이션 시에는 외부로 노출된 복셀만을 대상으로 물성변화를 계산함으로써 계산의 효율을 높인다. 화강암을 실험대상으로 하는 인공풍화(동결-융해 작용) 실험 자료를 근거로 함수를 정의하되 예측할 수 없는 자연환경에서의 물성변화를 적용하기 위해 확률 변수를 적용한다. 복셀의 노출 단면의 방향에 따라 물성변환 가중치를 차등 적용하여 복셀의 노출 위치에 따라 물성변화가 다르게 일어나도록 함으로써 석조물의 풍화현상을 보다 자연스럽게 표현한다.

[0038] 본 발명에 적용되는 3차원 모델의 복셀화 기법으로서, 복셀화는 우선 3차원 모델의 삼각 폴리곤과 육면체의 교차 판정을 이용하여 표면 복셀화(Surface Voxelization)를 수행하고, 표면 복셀화 정보를 이용한 내부 공간을 채우는 입체 복셀화(Solid Voxelization)를 수행한다.

[0039] 즉, 폴리곤으로 구성된 3차원 모델을 입체 복셀화하기 위해서는 표면 복셀화를 우선적으로 수행한다. 이를 위해 3차원 모델의 가로, 세로, 높이에 해당하는 3개의 축 중에서 한 개를 기준 축으로 할당하여 해상도를 설정하며, 복셀의 크기는 하기 식(1)과 같이 정의할 수 있다.

[0040] $V_{size} = \alpha_{Slect} / \varepsilon_{Resolution}$ … 식(1)

[0041] 여기서, V_{size}는 복셀의 크기, α_{Slect}는 선택된 축의 크기, $\varepsilon_{Resolution}$는 적용 해상도로 나타낸다.

[0042] 3차원 모델은 수많은 폴리곤으로 구성되며 일반적으로 한 개의 면은 삼각형 형태로 구성된다. 또한 복셀은 3차원 상에서 육면체로 구성된다. 따라서 표면에 대한 복셀화는 도 1에 도시된 바와 같이, 3차원 상의 삼각형과 육면체의 교차 여부를 판별하여 교차가 일어나는 위치에 객체 표면에 대한 복셀을 생성한다.

[0043] 도 1은 삼각형과 육면체의 교차에 따라 표면 복셀을 추출하는 과정을 설명하기 위한 도면이다.

[0044] 삼각형 형태의 폴리곤과 교차하는 복셀을 판별하기 위해서는 우선 삼각형을 구성하는 3개의 정점에 해당하는 x, y, z 축의 최대 최소값을 추출하여 사각 영역을 생성한다. 생성된 사각 영역을 복셀 크기로 분할하여 육면체를 만들고, 삼각형 형태의 폴리곤과 교차 판별 알고리즘을 적용하여 도 1에서와 같이 표면 복셀을 추출한다.

[0045] 다음에 표면 복셀화가 완료되면 복셀화된 객체의 내부를 채우는 입체 복셀화를 수행한다. 입체 복셀화 수행 시에는 3차원 상의 각 축 별로 주사선 알고리즘(Scan line algorithm)을 적용하여 내부를 복셀로 채우게 된다. 빠른 입체 복셀화를 위해 단방향으로 내부를 채우는 방법을 사용할 수 있지만, 이런 경우 복셀화 수행 시에 설정하는 해상도 또는 복셀화를 수행하는 3차원 모델의 형태에 따라 내부를 채우지 않아야 할 부분도 채워지는 경우가 발생한다.

[0046] 예를 들면, 도 2에서와 같이 내부가 비어있는 3차원 모델의 단면에 대해 입체 복셀화 과정에서 내부가 채워지는 문제가 발생할 수 있다.

[0047] 도 2는 3차원 모델의 단면에 대해 입체 복셀화 과정에서의 문제점을 제시하는 도면이다.

[0048] 이러한 경우를 방지하기 위해 본 발명에서는 각 축 별로 입체 복셀화를 수행한 후, 3축(x, y, z)의 모든 방향에 대해 중복 검출되는 복셀에 대해서만 입체 복셀 데이터로 사용한다.

[0049] 상술한 바와 같이, 3차원 모델을 복셀화 하는 경우 복셀 입자의 크기를 설정하는 해상도에 따라 계산량 및 메모리 사용량이 클 수 있다. 계산량은 생성하고자 하는 복셀의 크기가 작아짐에 따라서 기하급수적으로 수행시간이 증가할 수 있으며 메모리 사용량은 수행하는 컴퓨터의 사용 가능한 메모리를 초과하여 오류를 발생시킬 수 있다.

[0050] 본 발명에서는 이 두 가지 문제를 해결하기 위해 복셀화를 수행하는 컴퓨터의 스레드를 최대한 활용하는 병렬 처리로 계산 시간을 단축하고, 파일 처리를 통해 계산에 사용되는 데이터를 바이너리 파일로 저장하여 메모리 사용량을 최소화 한다.

[0051] 이하, 본 발명의 구성을 도면에 따라서 설명한다.

[0052] 도 3은 본 발명에 따른 객체의 복셀화 방법에 적용되는 파일 처리의 과정을 나타내는 도면이고, 도 4는 표면과 입체 복셀화 계산 시에 분할되어 사용된 바이너리 파일을 하나의 파일로 병합하는 형태를 나타내는 도면이고, 도 5는 본 발명에 따른 객체의 복셀화 방법에 적용되는 병렬 처리의 과정을 나타내는 도면이며, 도 6은 본 발명에 따른 병렬 처리에 의해 저장되는 파일의 형태를 나타내는 도면이다.

[0053] 본 발명에 적용되는 파일 처리로서, 도 3에 도시된 바와 같이, 먼저 복셀화 수행 시에 설정된 해상도 및 사용되는 스레드(Thread) 수에 따라 파일의 크기를 결정된다(S10).

[0054] 다음에 복셀화 과정에서 사용되는 바이너리 파일은 복셀 정보를 1 바이트(Byte)의 부울(Bool) 형태로 저장한다(S11). 복셀 정보를 비트 단위로 저장하면 파일 크기를 줄일 수 있겠지만 파일 위치 정보 색인 시의 처리 효율성을 위해 1 바이트 단위로 저장한다.

[0055] 한편, 병렬 처리를 위해 다중 스레드를 사용하는 경우에는 한 개의 파일에 대해 읽기는 다중 처리가 가능하고 쓰기는 다중 처리가 불가능하다. 이를 위해 본 발명에서는 사용되는 스레드 수만큼 파일을 분할하여 사용하고(S12), 계산 완료 후 병합한다(S13, S14).

[0056] 또한 파일의 분할 및 병합 그리고 파일 위치 색인 계산 시의 빠른 처리를 위해 스레드 수로 분할되는 축(z-축)의 계산되는 해상도를 파일 생성 시에만 스레드의 배수로 설정하여 파일의 크기를 결정한다.

[0057] 병렬 처리 시에 사용되는 분할 파일의 크기는 식 (2)와 같이 정의할 수 있으며, 최종적으로 병합된 파일의 크기는 식 (3)과 같이 정의할 수 있다.

[0058] $P_{size} = ((\alpha_x \times \alpha_y \times \beta_z)/V_{Size})/T_{cnt}$

[0059] $\beta_z = (\alpha_z + (T_{cnt} - (\alpha_z/V_{Size}) \bmod T_{cnt})) \times V_{Size}$ … 식(2)

[0060] $$F_{size} = \sum_{i=1}^{T_{cnt}} P_{size}$$ … 식(3)

[0061] 여기서, P_{size}은 병렬 처리 시에 사용되는 분할 바이너리 파일의 크기, α_x는 x축의 크기, α_y 는 y축의 크기, α_z는 z축의 크기, β_z는 스레드의 배수로 설정된 z축의 크기, T_{cnt}는 사용되는 스레드의 개수, F_{Size}는 병합된 파일의 크기로 나타내며, V_{Size}는 식(1)에서 정의한 복셀의 크기이다.

[0062] 도 4에 도시된 바와 같이, 본 발명에서는 표면과 입체 복셀화 계산 시에 분할되어 사용된 바이너리 파일을 하나의 파일로 병합하며, 분할 시의 축 방향으로 동일하게 병합하여 파일 위치 정보의 색인 처리 시에 효율성을 높였다.

[0063] 본 발명에서는 하기 식 (4)를 이용하여 파일에서의 복셀 데이터 위치를 설정하였다.

[0064] $F_{pos} = X_{pos} + (\alpha_x \times Y_{pos}) + (\alpha_x \times \alpha_y \times Z_{pos})$ … 식(4)

[0065] 여기서, F_{pos}는 파일에서의 복셀 데이터 정보, X_{pos}는 x축 복셀 위치, Y_{pos} 는 y축 복셀 위치, Z_{pos}는 z축 복셀 위치, α_x는 x축의 크기, α_y 는 y축의 크기, α_z는 z축의 크기이다.

[0066] 또한, 본 발명에 적용되는 병렬 처리로서, 도 5에 도시된 바와 같이, 복셀화를 병렬 처리할 경우에는 사용되는 스레드 수만큼 false(0x00)으로 초기화된 바이너리 파일을 생성한다(S20). 또 도 6에서와 같이 스레드 수만큼 계산 영역을 분할하여(S21) 각 영역의 복셀화 계산 시에 연동된 바이너리 파일을 사용하고, 복셀 정보로 판별된 위치 정보에 해당하는 연동된 바이너리 파일 위치에 true(0x01) 값을 덮어쓰기 한다(S22).

[0067] 표면 복셀화 계산 시에 각 스레드에서는 3차원 모델의 폴리곤 정보를 읽어 들여 자신의 계산 영역의 폴리곤 정보인지 판별 후 표면 복셀화 작업을 수행하며, 교차 판별된 복셀 정보는 연동된 바이너리 파일에 적용한다(S23).

[0068] 또 입체 복셀화 계산 시에 각 스레드에서는 자신의 계산 영역의 정보를 병합된 표면 복셀화 파일에서 읽어 들여 내부 채우기 계산을 수행하며 채우기로 판별된 복셀 정보는 연동된 바이너리 파일에 적용한다(S24).

[0069] 각 축 별로 입체 복셀화 계산이 완료되면 최종 입체 복셀화 파일을 생성하기 이전과 동일한 방식으로 분할된 바이너리 파일을 생성하고, 각 스레드 영역에서 각 축별 입체 복셀화 병합 파일의 동일 위치 해당하는 값의 중복 여부를 판별하여 연동된 바이너리 파일에 적용하고, 각 스레드의 계산이 완료되면 분할된 바이너리 파일을 병합하여 최종 입체 복셀화 파일을 생성한다(S25).

[0070] 이하, 본 발명에 적용되는 암석의 물성변화 매개변수 추출 및 함수 도출에 대해 설명한다.

[0071] 본 발명에서는 동결-융해 작용에 의한 암석의 입상붕괴 임계치를 추정한다. 동결-융해 작용을 이용한 인공풍화 실험 연구에서 화강암의 물성 중 공극률이 8~11% 이상이 되면 입상붕괴로 인해 측정 불가능하다고 알려져 있다. 본 발명에서는 이러한 자료를 토대로 화강암의 입상붕괴 임계치를 추정할 수 있었으며 물성변화 계산 시에 활용하였다.

[0072] 먼저, 암석의 동결-융해 작용에 의한 공극률 변화를 예측할 수 있는 함수를 정의한다. 이를 위해, 인공풍화 실험 연구결과를 토대로 공극률의 변화에 대한 계산식을 식(5)과 같이 정의한다.

[0073] $F_N = F_0 + A \times N$ … 식(5)

[0074] 여기서, N은 동결-융해 횟수, A는 공극률의 물성변화 계수, F_0는 초기 공극률을 의미하고, F_N은 동결-융해 사이클에 N번 노출된 이후의 변화된 공극률 나타낸다.

[0075] 식 (5)는 인공풍화 실험 연구 결과의 수치를 이용하여 도출한 계산식이다. 공극률의 변화는 동결-융해에 영향을 미치는 수분에 의한 것이며, 외부에 노출된 석조물의 모든 부분에 대해 수분의 영향이 같은 수 없다. 이를 토대로 암석의 입자를 육면체 형태의 복셀로 표현한 본 발명에서는 외부로 노출된 단면의 개수와 노출된 위치에 따라서 가중치를 차등 적용한 공극률의 변화를 식(6)과 같이 정의하였다.

[0076] $$P_N = P_{init} + \sum_{n=1}^{N}\sum_{s=1}^{E} A \times \alpha_{rate}$$ … 식(6)

[0077] 여기서, N은 동결-융해 횟수, A는 공극률의 물성변화 계수, P_{init}는 초기 공극률을 의미하고, P_N은 동결-융해 사이클에 N번 노출된 이후의 변화된 공극률, E는 외부에 노출된 단면의 개수, α_{per}은 외부 노출 단면의 위치에 따른 차등률을 나타낸다.

[0078] 다음에 물성변화의 계산에 대해 설명한다.

[0079] 먼저, 암석의 입자 정보를 추출한다

[0080] 입상붕괴 시뮬레이션을 위해서는 암석의 입자 데이터가 필요하다. 본 발명에서는 암석의 입자 데이터를 추출하기 위해 복셀 기법을 이용하였으며, 폴리곤으로 구성된 3차원 모델에 대해 복셀화를 수행하여 암석의 입자에 해당하는 복셀 데이터를 추출한다.

[0081] 도 7은 복셀화 수행 전후의 모델의 일 예를 나타낸 것으로서, 도 3의 [A]는 복셀화 수행 전의 폴리곤으로 구성된 3차원 모델을 나타내며, 도 3의 [B]는 복셀화가 완료된 모델을 나타낸다.

[0082] 다음에, 초기 물성값 계산을 실행하였다.

[0083] 입상붕괴 시뮬레이션 시에 사용되는 복셀화된 암석의 입자 정보에는 초기 공극률과 입상붕괴 임계치를 확률 변수를 이용하여 입력한다.

[0084] 하기 식 (7)은 초기 공극률의 설정 시에 사용되는 레일리 분포를 이용한 누적 분포에 대한 샘플링 함수이다.

[0085] $$P_{init} = P_{\min} + \sqrt{-2\sigma^2 \log(1-\gamma)}$$ … 식(7)

[0086] 여기서 P_{init}는 초기 공극률, P_{min}는 암석의 최소 공극률, σ는 정규 분포값, γ은 0 < γ<1 사이의 임의 실수로 나타낸다.

[0087] 상기 식 (7)에, 예를 들어 최소 공극률을 0.5, 정규 분포값은 0.5를 입력하여 산출된 200개의 초기 공극률 값은 도 8과 같다. 도 8은 본 발명에 적용되는 초기 공극률을 나타내는 그래프이다.

[0088] 하기 식 (8)은 입상붕괴 임계치로 사용되는 타일러 전개의 역함수를 이용한 가우시안 분포의 샘플링 함수이다.

$$P_{th} = P_{mean} + \sigma\sqrt{2}\,\frac{\sqrt{\beta_c}}{2}\sum_{n=0}^{4}\delta_n \qquad \cdots 식(8)$$

$$\beta_v = 2\gamma - 1 \qquad \beta_c = cos^{-1}(-1)$$

$$\delta_0 = \beta_v + \frac{\beta_c}{12}\beta_v^3 \qquad \delta_1 = \frac{7\beta_c^2}{480}\beta_v^5 \qquad \delta_2 = \frac{127\beta_c^3}{40320}\beta_v^7$$

$$\delta_3 = \frac{4369\beta_c^4}{5806080}\beta_v^9 \qquad \delta_4 = \frac{34807\beta_c^5}{182476800}\beta_v^{11}$$

[0089]

[0090] 여기서 P_{th}는 입상붕괴 임계치, P_{mean}는 암석의 입상붕괴 임계치의 평균값, σ는 정규 분포값, γ은 0 < γ<1 사이의 임의 실수로 나타낸다.

[0091] 상기 식 (8)에, 예를 들어 입상붕괴 임계치의 평균값을 9.0, 정규 분포값은 0.8을 입력하여 산출된 200개의 입상붕괴 임계치는 도 9와 같다. 도 9는 본 발명에 적용되는 입상붕괴 임계치 그래프를 나타낸다.

[0092] 다음에 상술한 바와 같은 식을 이용하여 입상붕괴 시뮬레이션을 실행하였다.

[0093] 본 발명에 따른 입상붕괴 시뮬레이션을 도 10 내지 도 12에 따라 설명한다.

[0094] 도 10은 복셀의 외부 노출 단면을 나타내는 도면이고, 도 11은 복셀 삭제에 의한 주변 복셀의 추가 외부 노출 방향을 나타내는 도면이며, 도 12는 본 발명에 따른 입상붕괴 시뮬레이션 진행 순서도 이다.

[0095] 본 발명에서는 도 12에 도시된 바와 같이, 외부 노출 복셀 수만큼 반복 처리하는 물성 변화 처리(S100)와 삭제된 복셀 수만큼 반복 처리하는 노출 단면 처리(S200)를 1 순환주기마다 반복 수행하며, 물성 변화 처리(S100)와 노출 단면 처리(S200)는 별도로 수행한다. 즉, 노출 단면 처리(S200)에서 삭제되는 복셀의 주변 복셀 중에서 노출 단면의 추가로 인해 외부 노출 복셀로 판정되면 현재의 순환주기에서 계산이 수행될 수 있으므로 이를 방지하기 위해 별도로 수행한다.

[0096] 일반적으로 암석의 입상붕괴는 외부에서부터 서서히 일어나기 때문에 외부에 노출된 암석 입자에 대해서 상기 식 (6)을 이용하여 입상붕괴 과정을 시뮬레이션한다. 암석 알갱이의 표면이 외부로 많이 노출될수록 입상붕괴는 빠르게 일어난다. 이러한 자연 현상을 시뮬레이션하기 위해 도 10에서와 같이 암석을 구성하는 입자에 해당하는 복셀에 대해 외부 노출 단면의 개수를 고려한다. 즉, 암석의 입자를 육면체 형태의 복셀로 표현하고, 외부 노출 단면 개수가 1개 이상인 복셀을 추출하고(S110), 물성 변화 처리를 외부 노출 단면 수만큼 반복한다(S120).

[0097] 한편, 각 복셀은 외부 노출 단면의 수만큼 공극률 변화 계산을 수행함으로써 공극률 변화에 의한 입상붕괴가 가속화되도록 한다. 외부에 노출된 석조물은 모든 부분에 대해 함수율이 같을 수 없다. 이러한 현상을 시뮬레이션하기 위해, 각 복셀에 대해 외부에 노출된 단면의 방향에 따라 가중치를 차등 적용한다(S121, S122). 즉, 도 10에 도시된 바와 같이, 상단, 측면, 하단 순서로 각 단면에 대한 함수율을 차등 적용한다.

[0098] 암석의 크기 또는 복셀의 크기를 어떻게 설정하는가에 따라 다르기는 하지만 암석의 입자를 복셀로 표현하면 하나의 암석이 많게는 수십만 개의 복셀로 이루어진다. 각 복셀은 암석의 입자에 해당하는 많은 정보를 가지고 있기 때문에 외부에 노출된 표면 복셀 정보만으로도 계산량이 많고 데이터 양이 방대하다.

[0099] 그러므로 본 발명에서는 시뮬레이션의 계산 효율성을 높이기 위해 암석의 표면을 구성하고 있는 복셀 만을 대상으로 계산을 수행한다. 즉, 계산의 효율을 위해 모든 복셀에 대해 공극률의 변화를 계산하지 않고 외부 노출 단면 개수가 1개 이상인 복셀에 대해서만 공극률의 변화를 계산한다.

[0100] 외부 노출 단면의 개수가 1개 이상인 복셀은 표면 복셀화 결과 데이터를 기본으로 설정하고 입체 복셀화 결과와 비교하여 계산에 사용될 외부 노출 단면이 1개 이상인 복셀들을 추출한다. 추출된 복셀들에 대해서 식(7)과 식(8)을 이용하여 초기 공극률 및 입상붕괴 임계치를 자동으로 부여한다(S130).

[0101] 상기 단계 S130에서 물성값이 임계치보다 작으면 상기 단계 S110으로 진행하여 상술한 과정을 반복한다. 한편

상기 단계 S130에서 물성값이 임계치보다 크면 복셀 정보를 삭제한다(S140).

[0102] 즉, 본 발명에서 암석의 입상붕괴에 의한 박리 효과는 시뮬레이션 시에 복셀의 삭제를 통해 표현된다. 각 복셀의 계산된 공극률이 입상붕괴 임계치보다 크면 입상붕괴가 이루어진 것으로 판단하여 해당 복셀은 삭제한다. 계산이 수행되는 동안 입상붕괴로 삭제되는 복셀이 발생하면 주변 복셀에 대해 외부 노출 여부를 판단하게 된다.

[0103] 다음에 노출 단면 처리(S200)로서 삭제된 복셀 정보를 추출한다(S210). 이 후, 도 11에서와 같이 삭제된 복셀의 주변 입자들에 대해서 외부 노출 단면을 추가하여(S220) 계산 속도를 향상시킬 수 있다. 새롭게 외부 복셀로 추가되는 복셀의 정보도 상기 식(7)과 식(8)을 이용하여 자동으로 초기 물성값을 부여한다.

[0104] 상술한 바와 같이, 추출된 복셀에 대한 물성 변화 처리(S100)와 삭제된 복셀의 노출 단면 처리(S200)를 1 순환주기마다 반복 수행하는 것에 의해 본 발명에 따른 입상붕괴 가시화가 실행된다.

[0105] 다음에 본 발명에 따른 입상붕괴 가시화 방법의 구현 결과를 시험하였다.

[0106] 즉, 본 발명의 결과를 확인하기 위해 Visual Studio 2012 환경에서 C++ 언어를 이용하여 다음과 같은 복셀화 결과 확인 프로그램과 입상붕괴 시뮬레이션 프로그램을 구현하였다.

[0107] 도 13은 본 발명에 따른 복셀화 결과 확인 프로그램을 나타내는 도면으로서, 3차원 폴리곤 모델에 대한 표면 복셀화 및 입체 복셀화 시에 산출되는 파일의 데이터를 그래프 정보로 확인하기 위해 구현하였다.

[0108] 복셀화 결과 확인 프로그램에서는 표면 복셀화 및 입체 복셀화 결과 파일을 선택 할 수 있으며, 화면에 복셀화 결과 파일에서의 각 축별 크기를 표시하고, 선택한 복셀화 결과 파일의 확인하고자 하는 단면의 축 방향과 위치를 입력하면 2차원 그래프로 단면 정보를 확인 가능하다.

[0109] 도 14는 본 발명에 따른 입상붕괴 시뮬레이션 프로그램을 나타내는 도면으로서, 입상붕괴 시뮬레이션을 수행하고 결과를 확인하기 위한 기능들(보기 설정, 복셀화 수행, 시뮬레이션, 다시 보기, 결과 화면)로 구성된다.

[0110] 도 14에서 보기 설정은 결과 화면에 전시되는 시뮬레이션 결과에 대한 결과 형태(물성값, 외부노출단면) 및 3차원 보기 설정을 기능으로 구성된다.

[0111] 복셀화 수행은 입상붕괴 시뮬레이션 시에 사용될 복셀화 파일 정보를 산출하기 위한 기능들로 해상도 설정을 위한 축 선택 및 해상도 설정 값을 입력할 수 있도록 구성하였다.

[0112] 시뮬레이션은 입상붕괴 시뮬레이션을 수행하기 위한 기능들로 다음과 같이 구성되었다. 외부 노출 단면 계산은 복셀화 수행에서 생성된 복셀화 파일 정보를 이용하여 시뮬레이션에 필요한 복셀 정보를 추출하고 해당 복셀의 외부 노출 단면을 계산하는 기능을 수행한다. 계수 및 위치별 차등율 입력 부분은 계수를 변경해서 시뮬레이션을 수행할 수 있도록 구성하였다. 시작, 중지, 재시작, 한번 수행은 시뮬레이션 실행 및 중지를 위한 기능들이며, 시뮬레이션 중지 횟수 입력을 할 수 있도록 구성하여 시뮬레이션 횟수의 제한을 두었다. 또한 현재 시뮬레이션 횟수, 삭제된 복셀 수, 계산중인 복셀 수, 총 복셀 수를 표시하여 진행 상황을 확인할 수 있도록 하였다. 시뮬레이션 수행 중의 데이터를 저장 여부 및 저장 간격을 설정하여 다시 보기 기능을 수행할 수 있도록 구성하였다.

[0113] 다시 보기는 시뮬레이션 수행 중에 저장된 파일을 이용하여 시뮬레이션 결과를 재확인할 수 있는 기능으로 구성된다.

[0114] 결과 화면은 입상붕괴 시뮬레이션의 결과를 확인하기 위한 화면으로 물성값 변화를 확인하기 위한 색상표와 3차원 객체 표시 부분으로 구성된다.

[0115] 본 발명에 따른 시험 환경은 CPU(Intel i7-2600 3.4GHz, 8 Threads), 메모리(4GB), 하드 디스크(1TB, 7200 rpm)를 가진 개인용 컴퓨터에서 Visual Studio 2012 환경의 C++ 언어로 복셀화 결과 확인 프로그램과 입상붕괴 시뮬레이션 프로그램 구현하여 시험을 수행하였다. 복셀화 결과 확인은 복셀화 결과 확인 프로그램을 이용하여 각 축별 단면의 결과를 확인한다. 입상붕괴 시뮬레이션은 각 시험 모델에 대해 총 7000회의 시뮬레이션을 수행하며, 공극률 계수는 0.06016, 위치별 차등 비율은 상단 100%, 측면 30%, 하단 5%의 계수를 적용하였다. 여기서 공극률 계수(0.06016)는 류성훈[16]의 연구결과를 활용하였다. 공극률 초기값 계산을 위한 최소 공극률은 0.5, 정규 분포값은 0.5로 적용하고, 입상붕괴 임계치 계산을 위한 임계치의 평균값은 9.0, 정규 분포값은 0.8로 적용하였다.

[0116] 시뮬레이션 수행 시에는 가시적인 효과를 위해서 참고한 인공풍화 실험에 비해 외부 노출 단면의 개수에 따라 최소 5%에서 최대 225%의 차등 비율이 적용되도록 설정하여 실험을 실시하였다.

[0117] 다양한 형태의 석조물에 대해 입상붕괴 현상을 살펴보기 위해서 시험에 사용되는 3차원 모델은 Princeton Shape Benchmark(PSB)의 3차원 모델 중 5개를 선택하여 사용하였으며, 본 발명의 데이터로 사용하기 위해 각 축에 회전 변환 적용함으로써 원본 데이터와의 축 정보가 다를 수 있다.

[0118] 본 발명에 사용된 모델의 정보는 표 1과 같다. 표 1은 3차원 모델 정보를 나타낸다.

표 1

[0119]

모델명		m23	m110	m329	m374	m1601
정점의 개수		462	453	6191	886	6727
면의 개수		878	902	12378	1770	13450
모델 형태		거미	토끼	손	몸통	체스말
축별 모델 크기	x축	0.450631	0.95	0.85366	0.526195	0.531126
	y축	0.400936	0.44555	0.329297	0.282288	0.52981
	z축	0.95	0.694399	0.95	0.95	0.95

[0120] 구현된 프로그램을 이용한 복셀화 시험은 해상도를 결정하는 기준 축을 x축, 해상도는 250, 사용하는 스레드 수는 8개로 적용하였다.

[0121] 도 15 내지 도 19는 시험에 사용되는 각각의 3차원 모델의 폴리곤 형태를 각 축별로 나타낸 것으로서, 도 15는 표 1에서 m23 모델의 폴리곤 형태를 나타내는 도면, 도 16은 표 1에서 m110 모델의 폴리곤 형태를 나타내는 도면, 도 17은 표 1에서 m329 모델의 폴리곤 형태를 나타내는 도면, 도 18은 표 1에서 m374 모델의 폴리곤 형태를 나타내는 도면, 도 19는 표 1에서 m1601 모델의 폴리곤 형태를 나타내는 도면이다.

[0122] 하기 표 2는 시험에 사용된 5개의 3차원 모델에 대한 복셀화 결과 정보를 나타낸다.

표 2

[0123]

모델명		m23	m110	m329	m374	m1601
축별 해상도	x축	250	250	250	250	250
	y축	552	528	641	462	249
	z축	224	392	720	832	448
표면 복셀 수		127,936	398,523	638,473	205,191	282,077
입체 복셀 수		2,082,014	16,016,824	22,736,219	40,733,286	5,859,827
전체 복셀 수		29,232,000	51,744,000	115,380,000	96,096,000	27,888,000
파일 크기(Byte)		29,232,032	51,744,032	115,380,032	96,096,032	27,888,032

[0124] 표 2는 x축 기준으로 해상도를 250으로 설정하여 복셀화를 수행한 결과이므로 x축의 해상도는 동일하며 y축과 z축은 크기에 비례하여 해상도가 설정된 것을 확인할 수 있다. 표면 복셀의 수는 시뮬레이션 수행 시에 사용되는 외부에 노출되는 표면 복셀들의 수를 나타낸다. 입체 복셀 수는 입체 복셀화 수행 후의 시뮬레이션에 사용되는 입체 복셀의 수를 나타낸다. 전체 복셀 수는 전체 복셀 데이터 수를 나타내며 파일 크기는 생성되는 파일의 크기를 나타낸다. 전체 복셀 수와 파일 크기는 32만큼 차이가 발생하게 되는데 복셀화 파일 생성 시에 파일 끝에 각 축의 해상도 및 입체 복셀 수를 각 unsigned int(8 Byte) 형식으로 저장하여 시뮬레이션 수행 시에 읽어서

사용할 수 있도록 하였다.

[0125] 상기 표 2에 따른 각각의 복셀화 결과에 대해 도 20 내지 도 29에 나타내었다.

[0126] 도 20은 m23 모델의 표면 복셀화 결과를 2차원 그래프 형식으로 각 축의 중심 단면을 나타내고, 도 21은 m23 모델의 입체 복셀화 결과를 2차원 그래프 형식으로 각 축의 중심 단면을 나타내고 있다.

[0127] 도 22는 m110 모델의 표면 복셀화 결과를 2차원 그래프 형식으로 각 축의 중심 단면을 나타내고, 도 23은 m110 모델의 입체 복셀화 결과를 2차원 그래프 형식으로 각 축의 중심 단면을 나타내고 있다.

[0128] 도 24는 m329 모델의 표면 복셀화 결과를 2차원 그래프 형식으로 각 축의 중심 단면을 나타내고, 도 25는 m329 모델의 입체 복셀화 결과를 2차원 그래프 형식으로 각 축의 중심 단면을 나타내고 있다.

[0129] 도 26은 m374 모델의 표면 복셀화 결과를 2차원 그래프 형식으로 각 축의 중심 단면을 나타내고, 도 27은 m374 모델의 입체 복셀화 결과를 2차원 그래프 형식으로 각 축의 중심 단면을 나타내고 있다.

[0130] 도 28은 m1601 모델의 표면 복셀화 결과를 2차원 그래프 형식으로 각 축의 중심 단면을 나타내고, 도 29는 m1601 모델의 입체 복셀화 결과를 2차원 그래프 형식으로 각 축의 중심 단면을 나타내고 있다.

[0131] 도 30은 시험 환경에서 구현된 프로그램을 이용하여 복셀화 수행시의 CPU 및 메모리 사용 현황을 나타낸다. CPU 사용 현황은 모든 스레드가 CPU 사용률 90% 이상임을 확인할 수 있다. 또한 메모리 사용 현황은 복셀화 수행 전과 수행 중의 사용량의 변화가 대체로 없음을 확인할 수 있다.

[0132] 다음에 본 발명에 따른 표면 복셀에서 외부 노출 단면 산출 결과에 대해 설명한다.

[0133] 표면 복셀의 외부 노출 단면은 입상붕괴 시뮬레이션을 수행하기 위해 표면 복셀 데이터와 주변 복셀을 파악하기 위해 입체 복셀 데이터 이용하여 산출한다. 본 발명에서는 표면 복셀들에 대한 외부 노출 단면 개수를 가시화하기 위해 도 30과 같이 외부 노출 단면 개수에 따른 색상표를 적용하여 결과를 확인하였다.

[0134] 도 31은 외부 노출 단면 색상표를 나타낸다.

[0135] 도 32 내지 도 36은 표 2에 나타낸 각 모델의 표면 복셀의 외부 노출 단면 산출 결과를 각 축별로 가시화한 것으로 굴곡이 많은 부분일수록 외부 노출 단면이 많은 것을 확인할 수 있다.

[0136] 도 32는 m32 모델의 표면 복셀의 외부 노출 단면 산출 결과를 복셀 객체에 색상표를 적용하여 각 축별로 가시화한 모습을 나타내고, 도 33은 m110 모델의 표면 복셀의 외부 노출 단면 산출 결과를 복셀 객체에 색상표를 적용하여 각 축별로 가시화한 모습을 나타내고, 도 34는 m329 모델의 표면 복셀의 외부 노출 단면 산출 결과를 복셀 객체에 색상표를 적용하여 각 축별로 가시화한 모습을 나타내고, 도 35는 m374 모델의 표면 복셀의 외부 노출 단면 산출 결과를 복셀 객체에 색상표를 적용하여 각 축별로 가시화한 모습을 나타내고, 도 36은 m1601 모델의 표면 복셀의 외부 노출 단면 산출 결과를 복셀 객체에 색상표를 적용하여 각 축별로 가시화한 모습을 나타낸다.

[0137] 상술한 바와 같은 시험에 의한 입상붕괴 시뮬레이션 결과는 암석의 입자를 표현하는 복셀의 물성변화에 의한 색상 변화와 박리에 의한 복셀의 삭제로 확인할 수 있다. 본 발명에서는 물성변화에 의한 색상 변화를 가시화하기 위해 도 37의 공극률 값에 대한 색상표를 적용하여 결과를 확인하였다. 또한 박리에 의한 복셀의 삭제는 시뮬레이션 주기에 따른 복셀 모델의 크기 변화로 결과를 확인하였다. 도 37은 공극률 값에 대한 색상표를 나타낸다.

[0138] 도 38 내지 도 42는 각 모델의 입상붕괴 시뮬레이션 가시화 결과를 나타낸다. 총 7000 주기의 시뮬레이션을 수행하였지만 결과를 확인하기 위한 특정 주기의 결과만을 추출하여 나타냈다.

[0139] 10 주기, 30 주기, 50 주기, 80 주기의 순차적인 결과를 통해서 공극률 값의 증가로 인한 색상 변화 및 입상붕괴 임계치 이상이 된 복셀들의 박리로 인한 입상붕괴를 확인할 수 있다.

[0140] 또 1000 주기, 3000 주기, 5000 주기, 7000 주기의 순차적인 결과를 통해서는 석조물의 형태와 노출되는 면의 위치에 따라 입상붕괴에 의한 박리로 인해 크기가 변화하는 것을 확인할 수 있다.

[0141] 도 38은 m32 모델의 입상붕괴 시뮬레이션 결과를 복셀 객체에 색상표를 적용하여 각 주기별로 가시화한 모습을 나타내고, 도 39는 m110 모델의 입상붕괴 시뮬레이션 결과를 복셀 객체에 색상표를 적용하여 각 주기별로 가시화한 모습을 나타내고, 도 40은 m329 모델의 입상붕괴 시뮬레이션 결과를 복셀 객체에 색상표를 적용하여 각 주기별로 가시화한 모습을 나타내고, 도 41은 m374 모델의 입상붕괴 시뮬레이션 결과를 복셀 객체에 색상표를 적

용하여 각 주기별로 가시화한 모습을 나타내며, 도 42는 m1601 모델의 입상붕괴 시뮬레이션 결과를 복셀 객체에 색상표를 적용하여 각 주기별로 가시화한 모습을 나타낸다.

[0142] 상술한 바와 같이, 본 발명에 따른 시뮬레이션을 결과를 통해서 시뮬레이션 주기에 따라 입상붕괴에 의한 풍화가 진행되어 석조물에 박리가 발생하여 크기가 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 표면에 굴곡이 있는 부분의 입자들에 대한 입상붕괴가 상대적으로 빠르게 이루어지는 것을 확인할 수 있다.

[0143] 도 43 내지 도 45는 본 발명에 따른 시뮬레이션을 통해 나타난 석조물의 형태에 따라 박리되는 정도와 박리형태를 보여주기 위한 것이다.

[0144] 도 43은 돌출된 부분의 박리 형태를 나타내는 도면으로서, 도 43에 도시된 바와 같이, m110 모델에서 토끼의 귀에 해당하는 외부로 크게 돌출된 부분에서 입상붕괴가 크게 일어나 다른 부분에 비해 입상붕괴에 의한 박리가 크게 일어나는 것을 확인할 수 있다.

[0145] 도 44는 상하 위치에 따른 박리 형태를 나타내는 도면으로서, 도 44에 도시된 바와 같이, m329 모델에서 사람 손의 엄지에 해당하는 부분은 상단 부분이 하단 부분 보다 입상붕괴에 의한 박리가 크게 일어나는 것을 확인할 수 있다.

[0146] 도 45는 홈이 파인 부분의 박리 형태를 나타내는 도면으로서, 도 45에 도시된 바와 같이, m374 모델에서 몸통 하단에 해당하는 홈이 파인 부분은 시뮬레이션 주기에 따라 주변으로 확대 형태로 입상붕괴에 의한 박리 나타나는 것을 확인할 수 있다.

[0147] 도 46은 시뮬레이션 주기별로 입상붕괴에 의한 박리로 삭제된 복셀의 수를 나타낸 그래프이다. 도 46의 그래프의 정보를 확인하고 다음과 같은 결과를 확인할 수 있었다. 첫째, 공극률 계수와 차등률을 동일하게 적용함으로 인해 모든 모델의 결과에서 80주기에서부터 복셀의 삭제가 발생하기 시작함 확인할 수 있다. 둘째, 시뮬레이션이 500회까지 진행되는 동안 입상붕괴에 의한 박리로 인해 삭제되는 복셀의 양이 큰 폭으로 변화하는 것을 확인할 수 있다. 이는 객체 표면이 초기에 섬세하게 조각된 굴곡면으로 인해 외부로 노출되는 복셀들이 많이 존재한다는 것을 의미한다. 또한 시뮬레이션 초기에 입상붕괴가 주로 이들 복셀들에 대해 일어난다는 것을 의미한다.

[0148] 도 47은 최초 시뮬레이션 수행 시의 계산되는 복셀 개수에 대한 주기별로 계산되는 복셀 수를 백분율로 나타낸 그래프이다. 도 47의 그래프의 정보를 확인하고 다음과 같은 결과를 확인할 수 있었다. 첫째, 시뮬레이션 80주기에서부터 도 46에서와 같이 복셀의 삭제가 발생하기 시작함으로 인해 계산되는 복셀의 수가 변동되는 것을 확인할 수 있다. 둘째, 복셀의 삭제에 의해 표면적이 줄어 계산되는 표면 복셀의 수가 연속적으로 감소할 것이라 예상했지만 석조물의 형태에 따라 계산되는 표면 복셀의 수가 증가함을 확인할 수 있다. 이는 도 45와 같이 홈이 파인 부분에 대한 박리 현상으로 인해 주변으로 확대되는 과정에서 표면적이 증가함을 의미한다.

[0149] 본 발명은 상술한 바와 같은 과정을 통해 석조물의 입상붕괴를 가시화할 수 있는 시뮬레이터를 구현하였고, 여러 형태의 3차원 모델을 이용하여 입상붕괴 시뮬레이션을 수행하였고, 입상붕괴에 의한 암석 입자의 박리되는 현상은 효과적으로 가시화할 수 있었다.

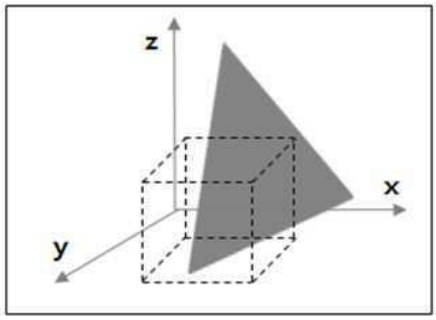
[0150] 이상 본 발명자에 의해서 이루어진 발명을 상기 실시 예에 따라 구체적으로 설명하였지만, 본 발명은 상기 실시 예에 한정되는 것은 아니고 그 요지를 이탈하지 않는 범위에서 여러 가지로 변경 가능한 것은 물론이다.

산업상 이용가능성

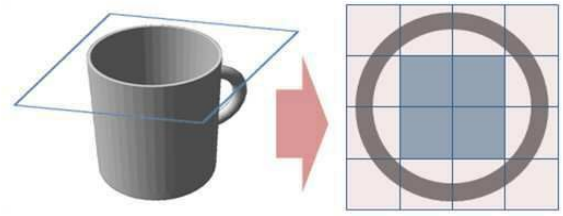
[0151] 본 발명에 따른 복셀 구조를 이용한 석재의 물성변화 추정 및 입상붕괴 가시화 방법을 사용하는 것에 의해 열화과정에 대한 가상 시뮬레이터, 물질 변환에 대한 모의실험 가시화 분야, 가상현실을 이용한 엔터테인먼트 분야에 적용할 수 있다.

도면

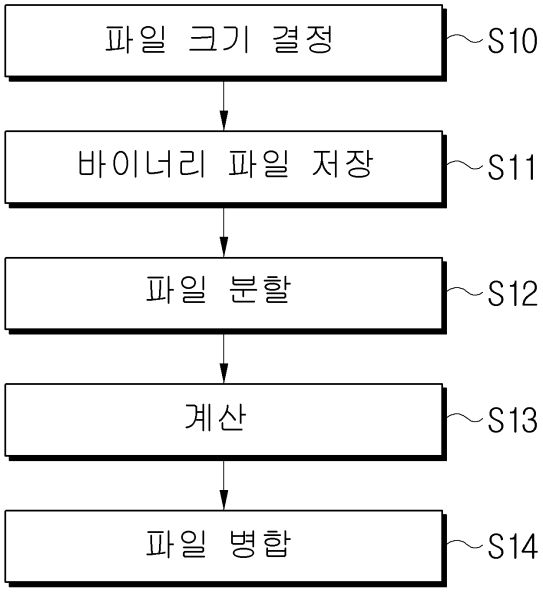
도면1



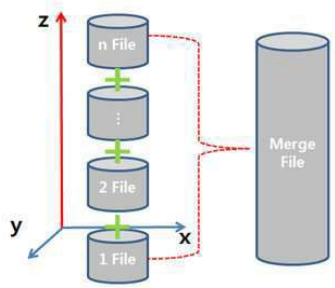
도면2



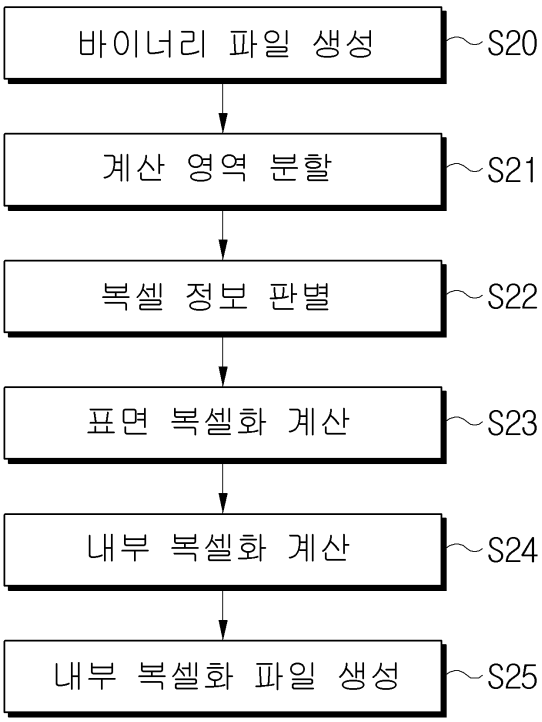
도면3



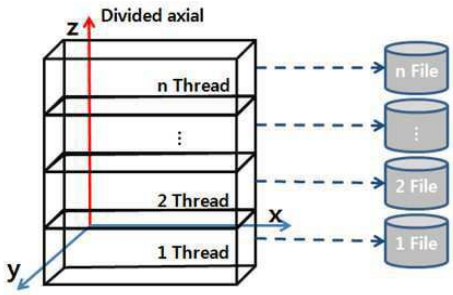
도면4


z
n File
2 File
1 File
y
x
Merge File

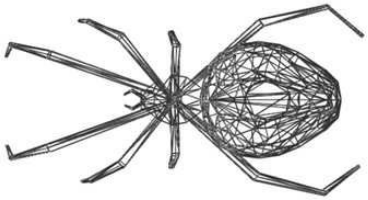
도면5


바이너리 파일 생성
S20
계산 영역 분할
S21
복셀 정보 판별
S22
표면 복셀화 계산
S23
내부 복셀화 계산
S24
내부 복셀화 파일 생성
S25

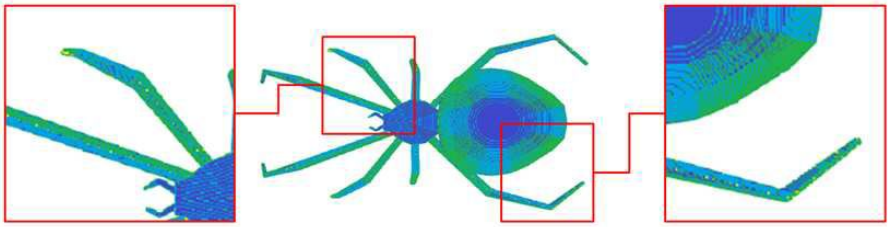
도면6


Divided axial
z
n Thread
2 Thread
1 Thread
x
y
n File
2 File
1 File

도면7

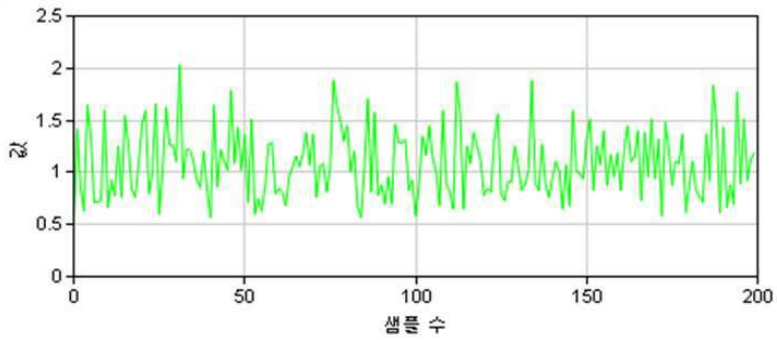


[A]

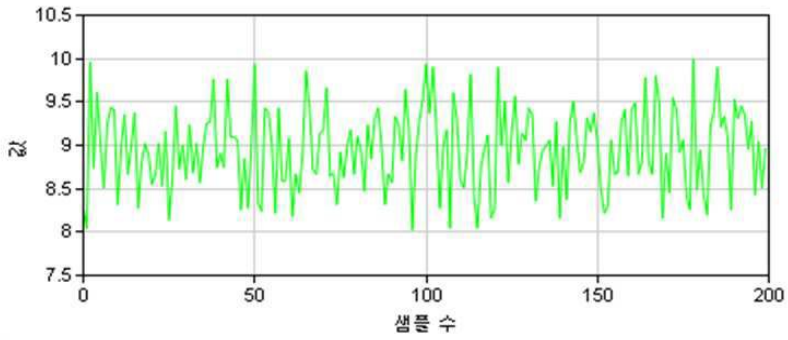


[B]

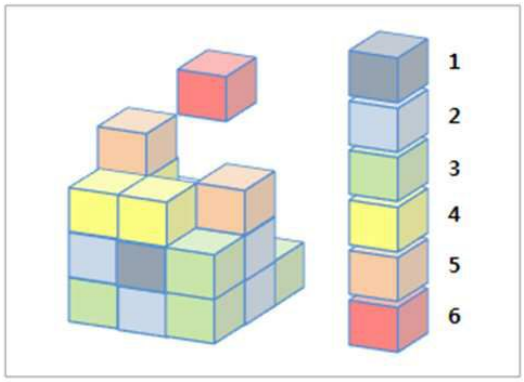
도면8



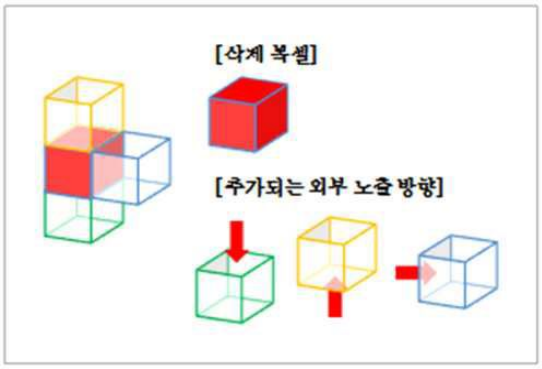
도면9



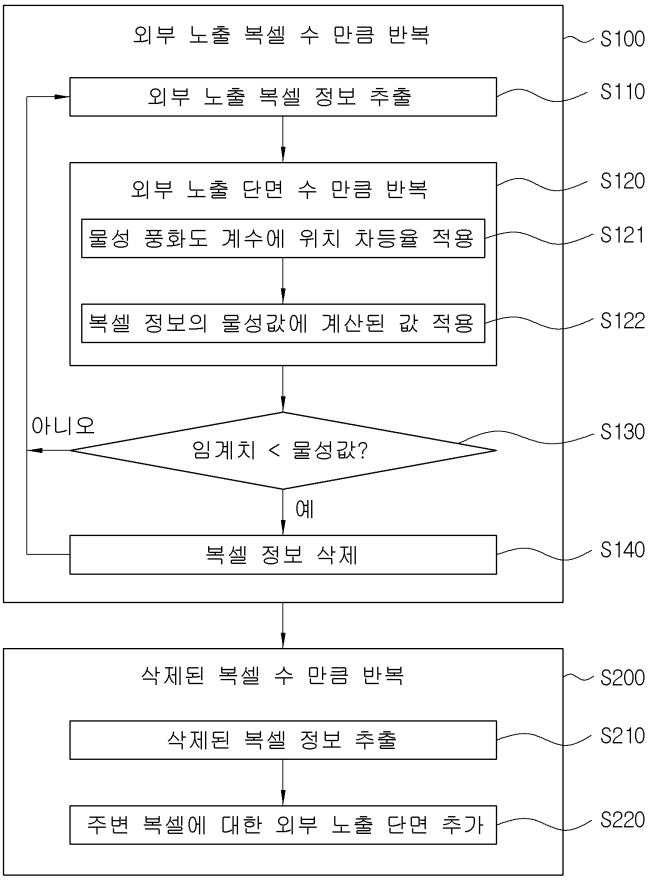
도면10



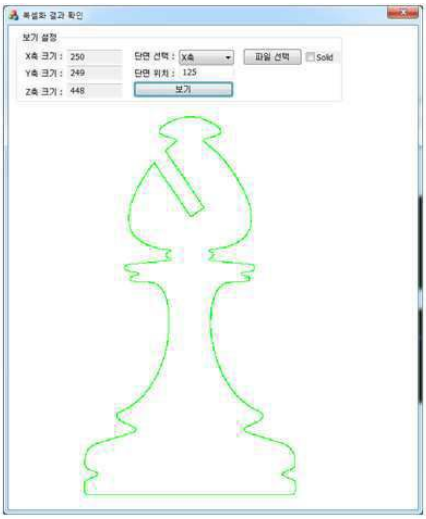
도면11



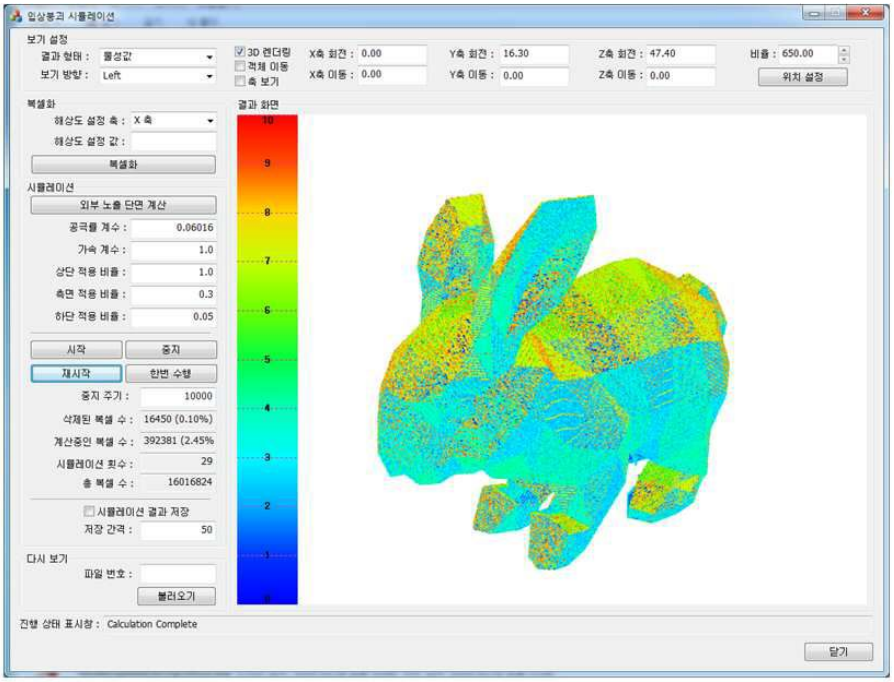
도면12


외부 노출 복셀 수 만큼 반복
S100
외부 노출 복셀 정보 추출
S110
외부 노출 단면 수 만큼 반복
S120
물성 풍화도 계수에 위치 차등율 적용
S121
복셀 정보의 물성값에 계산된 값 적용
S122
아니오
임계치 < 물성값?
S130
예
복셀 정보 삭제
S140
삭제된 복셀 수 만큼 반복
S200
삭제된 복셀 정보 추출
S210
주변 복셀에 대한 외부 노출 단면 추가
S220

도면13



도면14



도면15



x축 방향 y축 방향 z축 방향

도면16



x축 방향 y축 방향 z축 방향

도면17



x축 방향 y축 방향 z축 방향

도면18



x축 방향 y축 방향 z축 방향

도면19



x축 방향 y축 방향 z축 방향

도면20

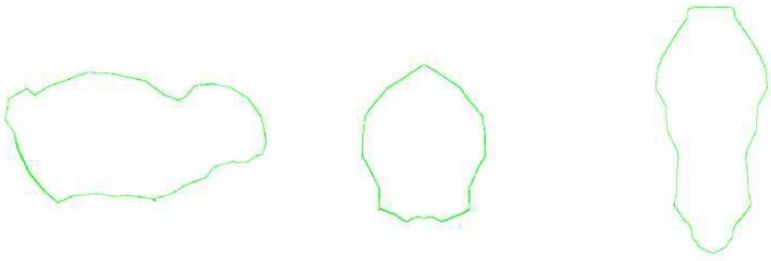


x축 방향 y축 방향 z축 방향

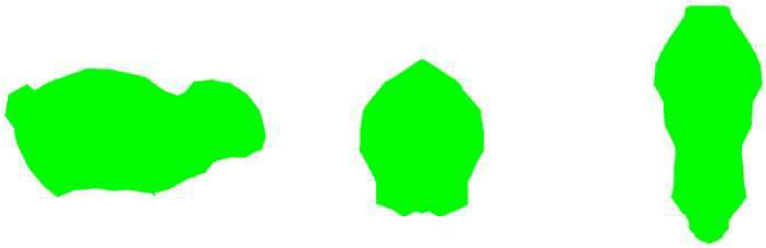
도면21



도면22



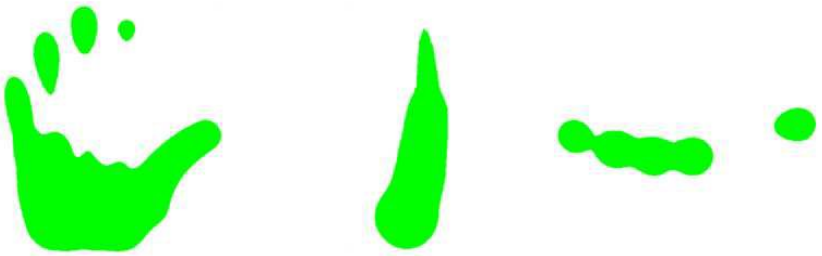
도면23



도면24



도면25



도면26



도면27



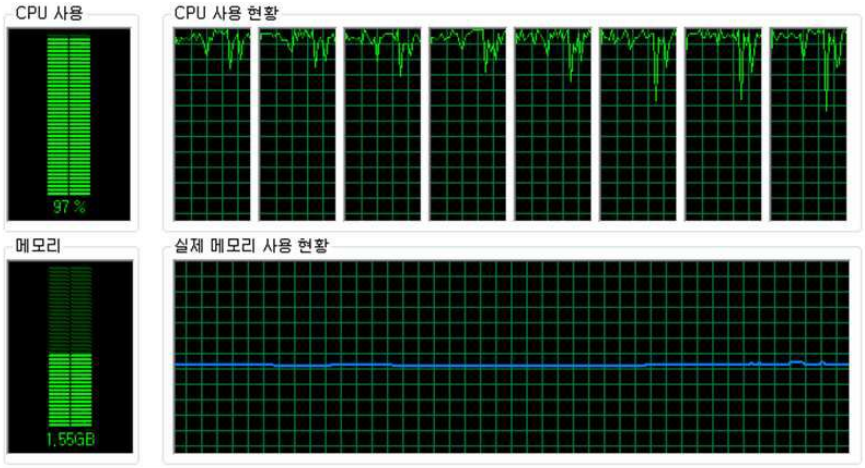
도면28



도면29



도면30



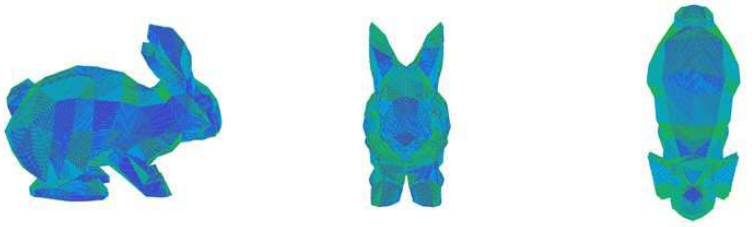
도면31

외부 노출 단면 수	1	2	3	4	5	6
색 상						

도면32

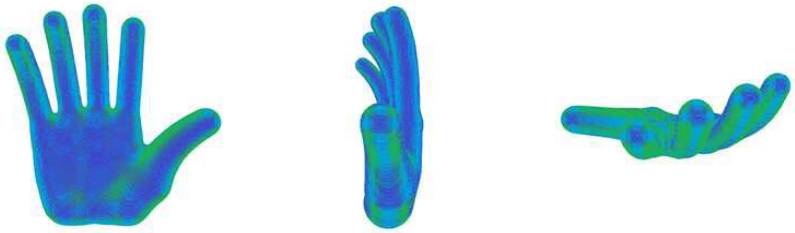


도면33



x축 방향 y축 방향 z축 방향

도면34



x축 방향 y축 방향 z축 방향

도면35



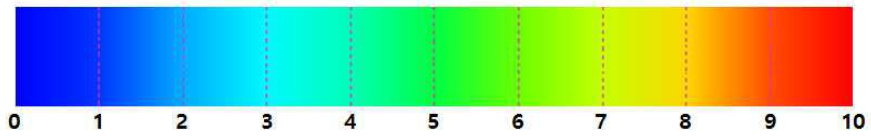
x축 방향 y축 방향 z축 방향

도면36

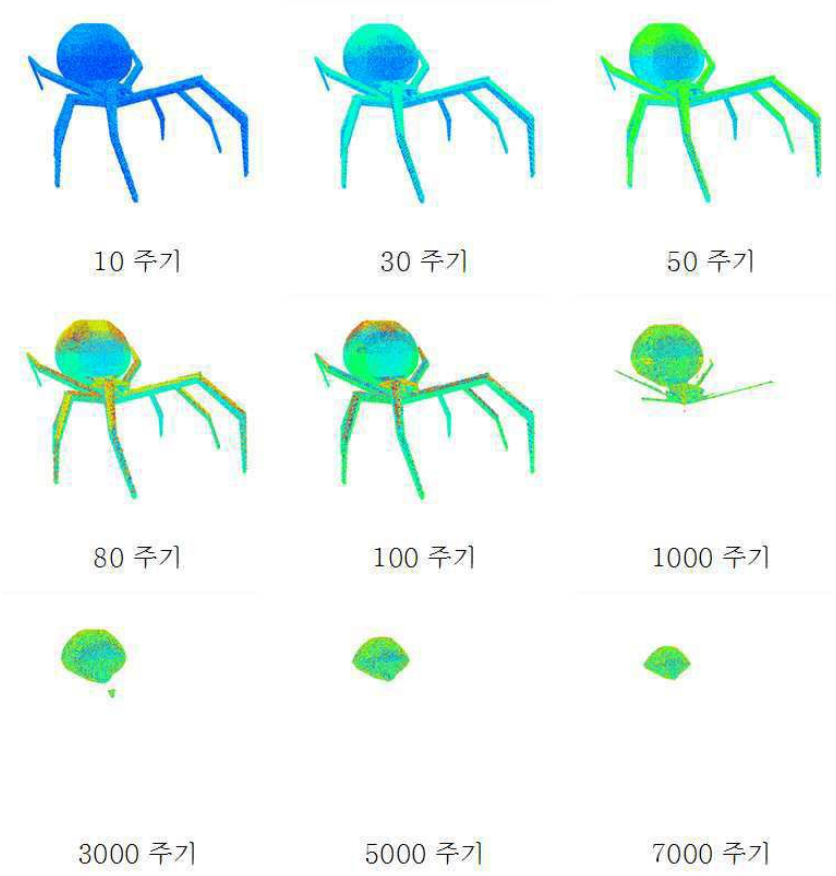


x축 방향 y축 방향 z축 방향

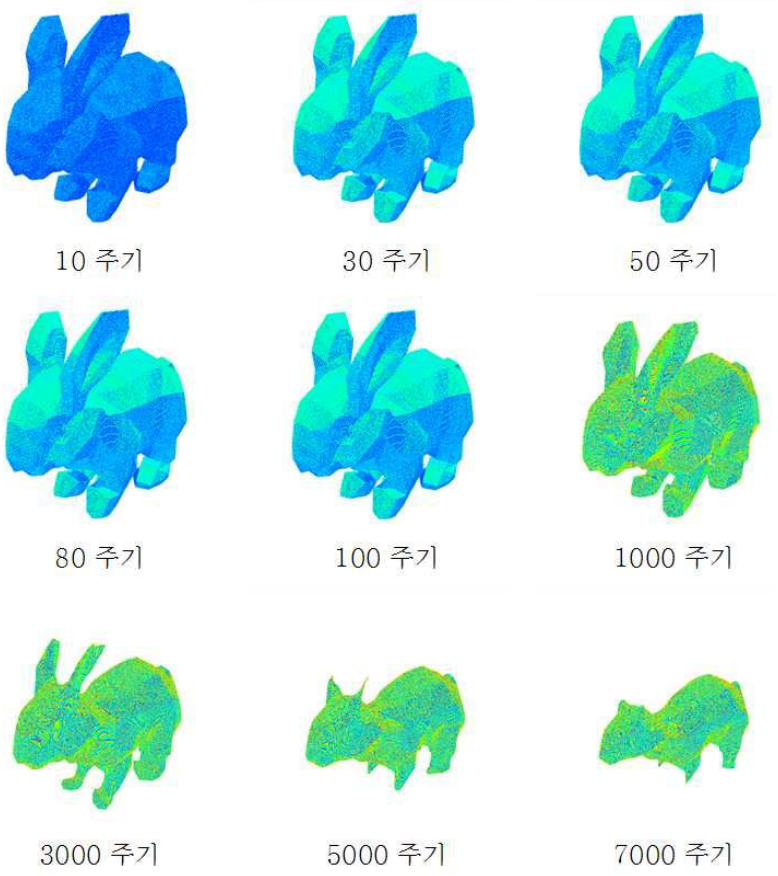
도면37


0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

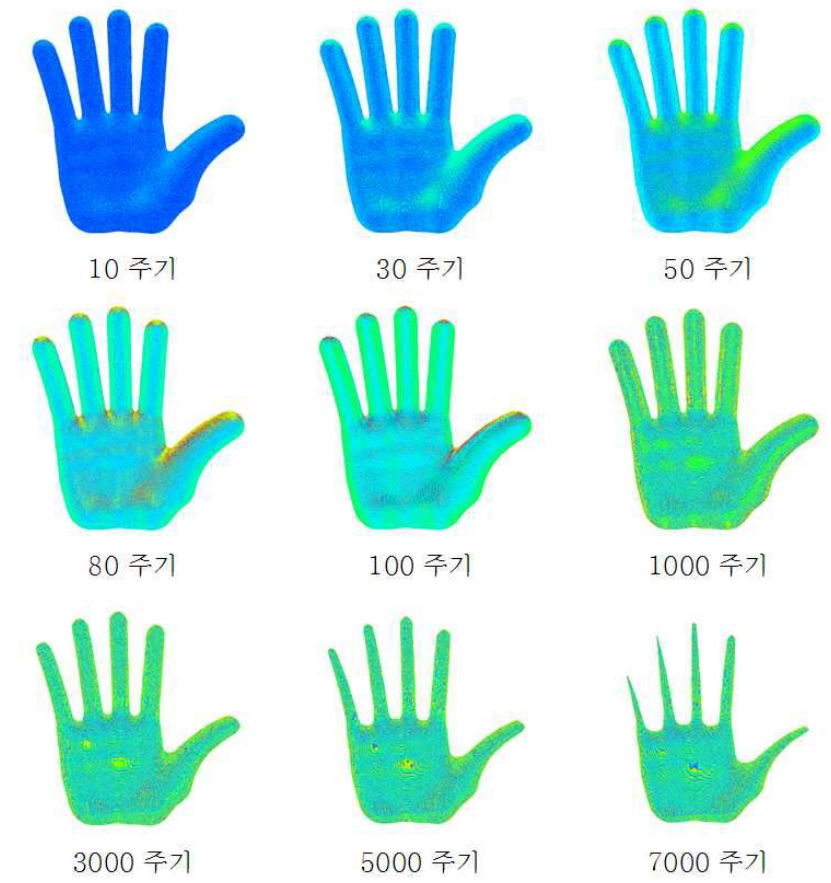
도면38


10 주기
30 주기
50 주기
80 주기
100 주기
1000 주기
3000 주기
5000 주기
7000 주기

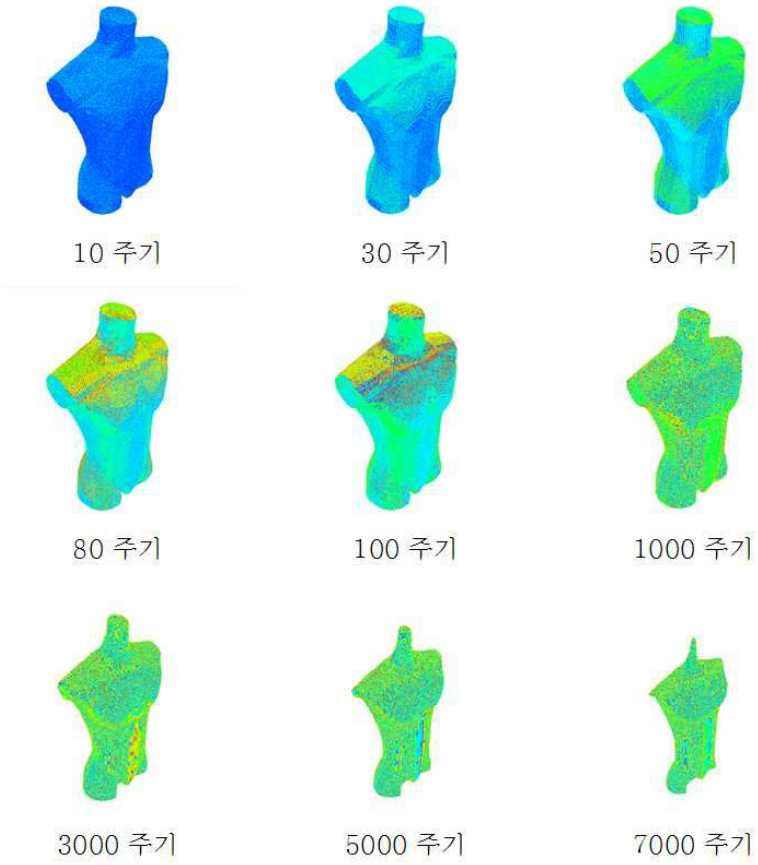
도면39



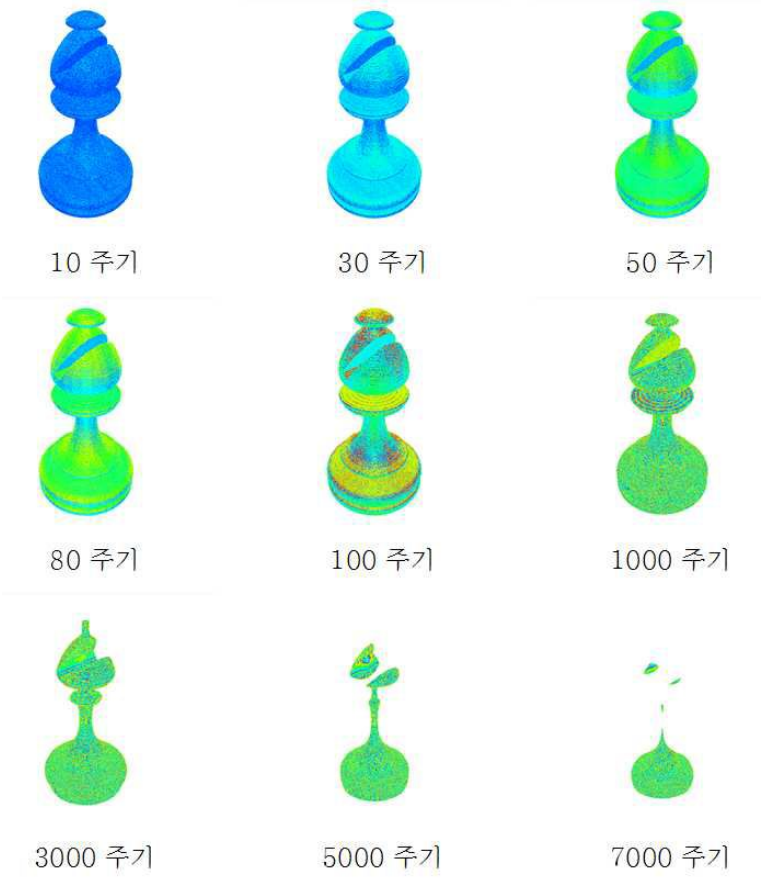
도면40



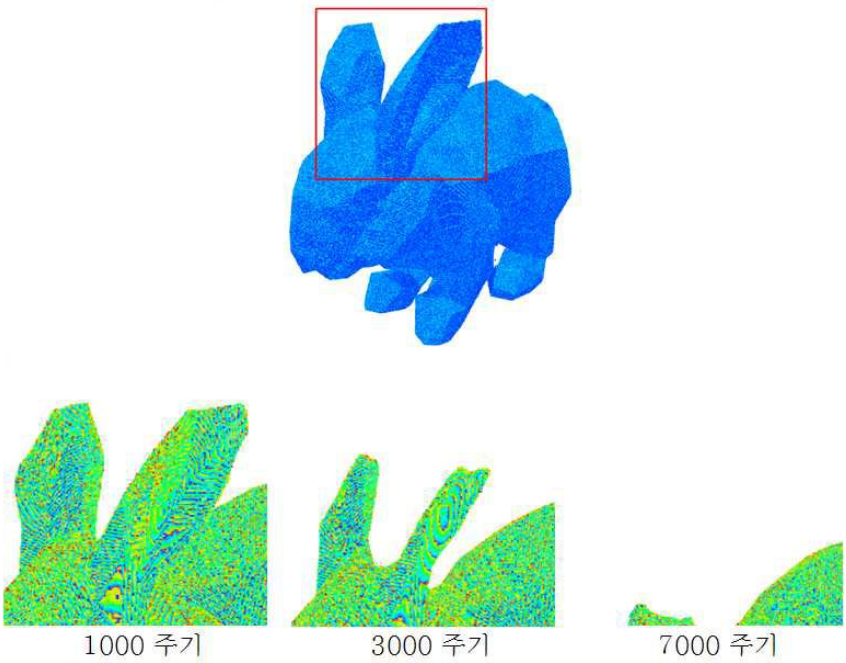
도면41



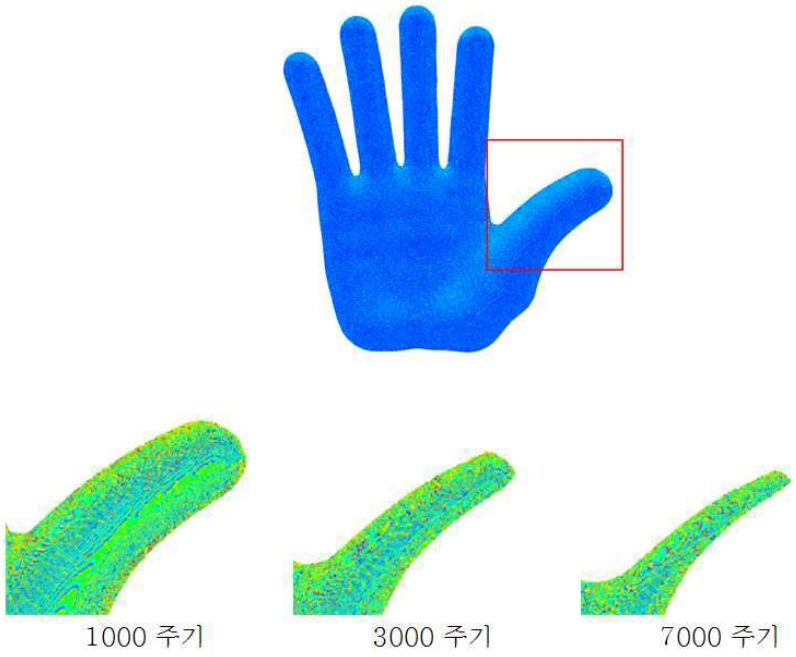
도면42


10 주기
30 주기
50 주기
80 주기
100 주기
1000 주기
3000 주기
5000 주기
7000 주기

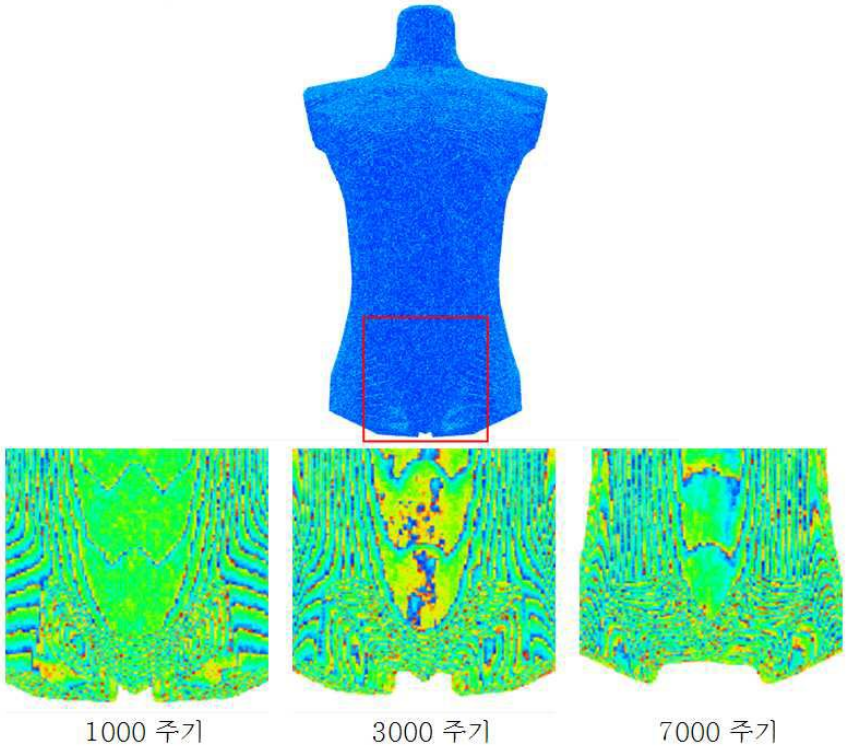
도면43


1000 주기
3000 주기
7000 주기

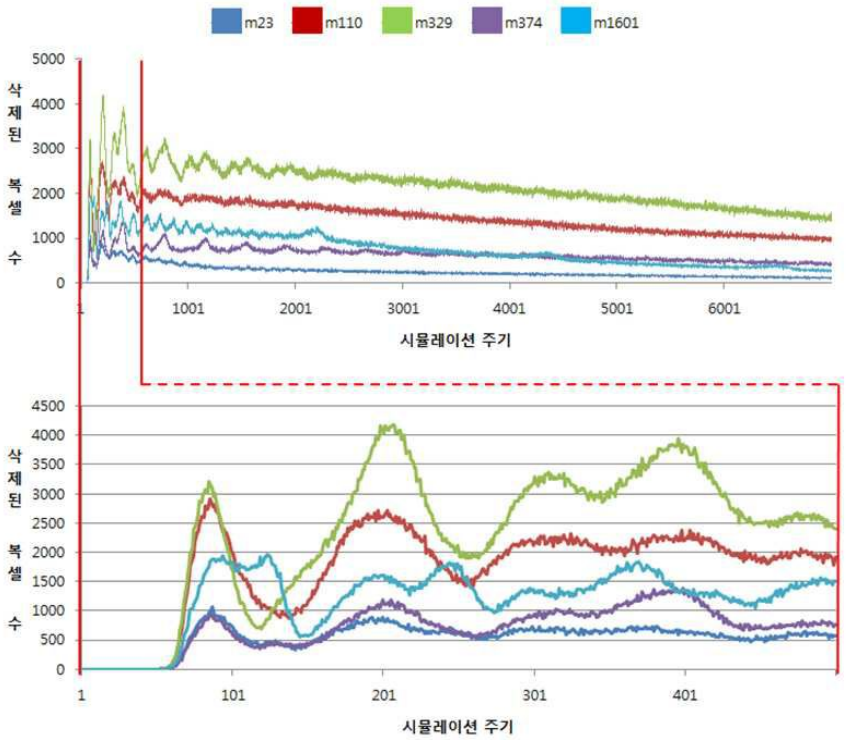
도면44



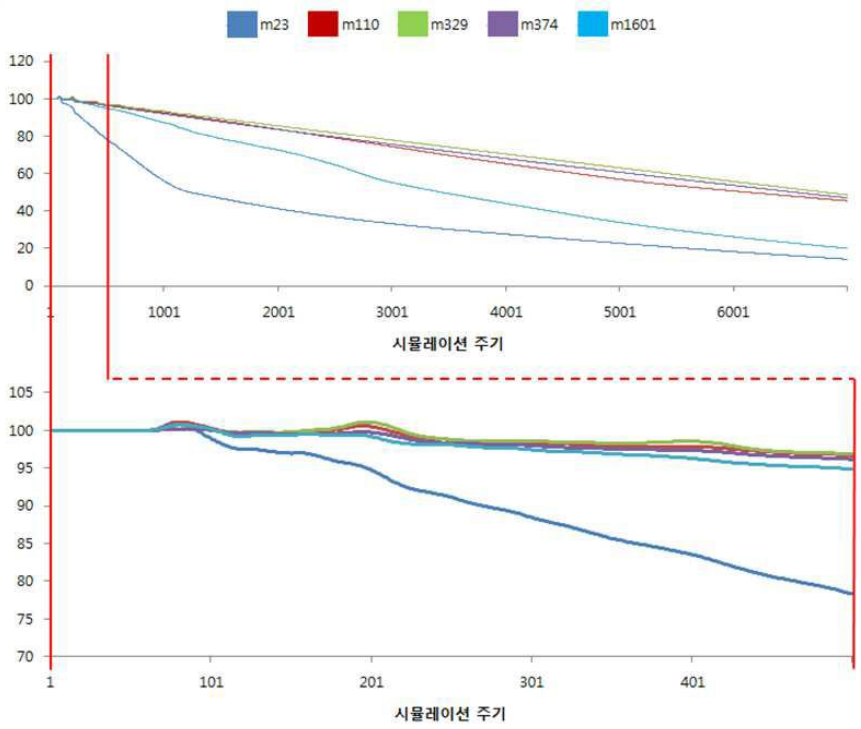
도면45



도면46


m23
m110
m329
m374
m1601
삭제된 복셀 수
시뮬레이션 주기
삭제된 복셀 수
시뮬레이션 주기

도면47


m23
m110
m329
m374
m1601
시뮬레이션 주기
시뮬레이션 주기