



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2013-0137557  
(43) 공개일자 2013년12월17일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
**G06F 19/00** (2011.01)  
(21) 출원번호 10-2013-0064789  
(22) 출원일자 2013년06월05일  
심사청구일자 **없음**  
(30) 우선권주장  
13/491,164 2012년06월07일 미국(US)

(71) 출원인  
**다솔 시스템즈 시뮬리아 코포레이션**  
미국 02909 로드 아일랜드주 프로비던스 벌리 스  
트리트 166  
(72) 별명자  
**시아 린**  
미국 02864 로드 아일랜드주 컴벌랜드 애비 드라  
이브 333  
**두 전-중**  
미국 02806 로드 아일랜드주 배링턴 에버그린 스  
트리트 17  
**홀레버 크리스**  
미국 02806 로드 아일랜드주 배링턴 매사추세츠  
애비뉴 5  
(74) 대리인  
**특허법인코리아나**

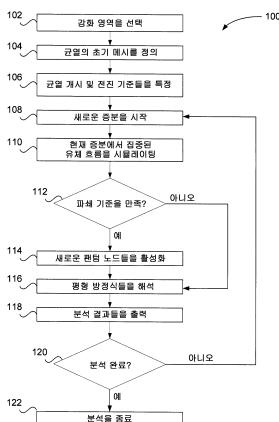
전체 청구항 수 : 총 20 항

(54) 발명의 명칭 **확장 유한 요소법에 의한 수압 파쇄 시뮬레이션**

### (57) 요 약

컴퓨터 구현 방법은 강화 영역에서 노드들의 제 1 세트 및 노드들의 제 2 세트의 각 포지션들을 정의하는 단계, 및 노드들의 제 1 세트에서 강화 영역에 대한 커플링된 기공 유체 확산 및 응력 분석을 수행하는 단계를 포함한다. 그 후에, 분석의 결과로서 노드들의 제 2 세트가 활성화 (파쇄를 나타냄) 되는지 여부가 결정되고, 그 결과들이 사용자에게 시각적으로 출력된다.

### 대 표 도 - 도1



## 특허청구의 범위

### 청구항 1

강화 (enrichment) 영역에서 노드들의 제 1 세트 및 노드들의 제 2 세트의 각 포지션들을 정의하는 단계;

상기 노드들의 제 1 세트에서 상기 강화 영역에 대한 커플링된 기공 유체 확산 및 응력 분석 (coupled pore fluid diffusion and stress analysis) 을 수행하는 단계;

상기 분석의 결과로서 상기 노드들의 제 2 세트가 활성화되는지 여부를 결정하는 단계; 및

상기 결과들을 사용자에게 시각적으로 출력하는 단계를 포함하는, 컴퓨터 구현 방법.

### 청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 강화 영역을 정의하는 단계를 더 포함하는, 컴퓨터 구현 방법.

### 청구항 3

제 1 항에 있어서,

상기 강화 영역 내의 초기 균열 (crack) 을 정의하는 단계를 더 포함하는, 컴퓨터 구현 방법.

### 청구항 4

제 1 항에 있어서,

상기 강화 영역 내의 균열 개시 기준들 및 균열 진전 기준들을 정의하는 단계를 더 포함하는, 컴퓨터 구현 방법.

### 청구항 5

제 1 항에 있어서,

상기 노드들의 제 2 세트가 활성화되는지 여부를 결정하는 단계는,

상기 강화 영역의 특성들에 기초하여 파쇄 (fracture) 기준을 정의하는 단계; 및

상기 파쇄 기준이 상기 분석 동안 만족되는지 여부를 결정하는 단계를 포함하는, 컴퓨터 구현 방법.

### 청구항 6

제 1 항에 있어서,

하나 이상의 평형 (equilibrium) 방정식들에 대한 해들을 연산하는 단계를 더 포함하고,

상기 하나 이상의 평형 방정식들은, 상기 분석의 결과로서 상기 노드들의 제 2 세트가 활성화되는지 여부에 기초하는, 컴퓨터 구현 방법.

### 청구항 7

강화 영역에서 노드들의 제 1 세트 및 노드들의 제 2 세트의 각 포지션들을 저장하도록 구성된 메모리 영역; 및

상기 메모리 영역에 커플링된 프로세서를 포함하는 컴퓨터로서,

상기 프로세서는,

상기 노드들의 제 1 세트에서 상기 강화 영역에 대한 커플링된 기공 유체 확산 및 응력 분석을 수행하고;

상기 분석의 결과로서 상기 노드들의 제 2 세트가 활성화되는지 여부를 결정하며;

상기 결과들을 사용자에게 시각적으로 출력하도록 구성되는, 컴퓨터.

#### 청구항 8

들 7 항에 있어서,

상기 프로세서는 또한, 상기 강화 영역을 정의하도록 구성되는, 컴퓨터.

#### 청구항 9

제 7 항에 있어서,

상기 프로세서는 또한, 상기 강화 영역 내의 초기 균열을 정의하도록 구성되는, 컴퓨터.

#### 청구항 10

제 7 항에 있어서,

상기 프로세서는 또한, 상기 강화 영역 내의 균열 개시 기준들 및 균열 진전 기준들을 정의하도록 구성되는, 컴퓨터.

#### 청구항 11

제 7 항에 있어서,

상기 프로세서는 또한,

상기 강화 영역의 특성들에 기초하여 파쇄 기준을 정의하고;

상기 파쇄 기준이 상기 분석 동안 만족되는지 여부를 결정하도록 구성되는, 컴퓨터.

#### 청구항 12

제 7 항에 있어서,

상기 프로세서는 또한, 하나 이상의 평형 방정식들에 대한 해들을 연산하도록 구성되고,

상기 하나 이상의 평형 방정식들은, 상기 분석의 결과로서 상기 노드들의 제 2 세트가 활성화되는지 여부에 기초하는, 컴퓨터.

#### 청구항 13

제 7 항에 있어서,

상기 프로세서는 또한, 상기 강화 영역 내의 유체 압력 필드 및 유체 흐름에서의 불연속부들을 모델링하도록 구성되는, 컴퓨터.

#### 청구항 14

컴퓨터 실행가능 컴포넌트들을 갖는 하나 이상의 비일시적 컴퓨터 판독가능 저장 매체를 포함하는 컴퓨터 프로그램 제품으로서,

상기 컴퓨터 실행가능 컴포넌트들은,

프로세서에 의해 실행될 때, 상기 프로세서로 하여금, 강화 영역에서 노드들의 제 1 세트 및 노드들의 제 2 세트의 각 포지션들을 정의하게 하는 정의 컴포넌트; 및

프로세서에 의해 실행될 때, 상기 프로세서로 하여금, 상기 노드들의 제 1 세트에서 상기 강화 영역에 대한 커플링된 기공 유체 확산 및 응력 분석을 수행하게 하고; 상기 분석의 결과로서 상기 노드들의 제 2 세트가 활성화되는지 여부를 결정하게 하며; 상기 결과들을 사용자에게 시각적으로 출력하게 하는 분석 컴포넌트를 포함하는, 하나 이상의 비일시적 컴퓨터 판독가능 저장 매체를 포함하는 컴퓨터 프로그램 제품.

#### 청구항 15

제 14 항에 있어서,

상기 정의 컴포넌트는 또한, 상기 프로세서로 하여금 상기 강화 영역을 정의하게 하는, 하나 이상의 비일시적 컴퓨터 판독가능 저장 매체를 포함하는 컴퓨터 프로그램 제품.

### 청구항 16

제 14 항에 있어서,

상기 정의 컴포넌트는 또한, 상기 프로세서로 하여금 상기 강화 영역 내의 초기 균열을 정의하게 하는, 하나 이상의 비일시적 컴퓨터 판독가능 저장 매체를 포함하는 컴퓨터 프로그램 제품.

### 청구항 17

제 14 항에 있어서,

상기 정의 컴포넌트는 또한, 상기 프로세서로 하여금 상기 강화 영역 내의 균열 개시 기준들 및 균열 진전 기준들을 정의하게 하는, 하나 이상의 비일시적 컴퓨터 판독가능 저장 매체를 포함하는 컴퓨터 프로그램 제품.

### 청구항 18

제 14 항에 있어서,

상기 분석 컴포넌트는 또한, 상기 프로세서로 하여금,

상기 강화 영역의 특성들에 기초하여 파쇄 기준을 정의하게 하고;

상기 파쇄 기준이 상기 분석 동안 만족되는지 여부를 결정하게 하는, 하나 이상의 비일시적 컴퓨터 판독가능 저장 매체를 포함하는 컴퓨터 프로그램 제품.

### 청구항 19

제 14 항에 있어서,

상기 분석 컴포넌트는 또한, 상기 프로세서로 하여금 하나 이상의 평형 방정식들에 대한 해들을 연산하게 하고,

상기 하나 이상의 평형 방정식들은, 상기 분석의 결과로서 상기 노드들의 제 2 세트가 활성화되는지 여부에 기초하는, 하나 이상의 비일시적 컴퓨터 판독가능 저장 매체를 포함하는 컴퓨터 프로그램 제품.

### 청구항 20

제 14 항에 있어서,

상기 분석 컴포넌트는 또한, 상기 프로세서로 하여금 상기 강화 영역 내의 유체 압력 필드 및 유체 흐름에서의 불연속부들을 모델링하게 하는, 하나 이상의 비일시적 컴퓨터 판독가능 저장 매체를 포함하는 컴퓨터 프로그램 제품.

## 명세서

### 기술분야

[0001] 여기에 기술된 실시형태들은 일반적으로 시뮬레이션 모델링에 관한 것으로, 더 상세하게는, 생명 과학분야에서 유체 흐름을 모델링하고 암석의 수압 파쇄 (hydraulic fracture) 를 시뮬레이팅하는 것에 관한 것이다.

### 배경기술

[0002] 수압 파쇄 (보통 "프래킹 (fracking)" 이라고 지칭한다) 는, 비교적 높은 유량과 압력으로 유체를 펌핑하는 것에 의한 지중 균열 (underground crack) 의 개시 및 진전의 프로세스이다. 수압 파쇄는, 지면 아래의 깊은 곳에서의 증진된 원유 및 가스 회수를 포함하여, 다양한 이유로 소망된다. 수압 파쇄 동작들로부터의 필드 데이터는 주로 압력 반응 곡선들의 형태로 존재한다. 이러한 데이터만으로부터 실제 수압 파쇄 지오메트리 를 정의하기는 어렵다. 그래서, 이를 수압 파쇄들의 위치, 방향, 및 크기를 평가하고 예측하기 위해 분석 솔루션들 및 수치 시뮬레이션들이 이용된다.

[0003] 수압 파쇄를 위한 초기의 단순화된 이론적 모델들은 탄성 평면 변형 균열 솔루션을 이용하여 소위 PK 모델을 확립하도록 한다. 다른 시도된 솔루션들은 상이한 경우들에 대한 분석 솔루션들을 획득하기 위해 상당한 양의 연구를 이용하였다. 그러나, 분석 모델 및 경험적 접근법들은 임의의 형상 및 배향들의 파쇄들을 핸들링 할 수 없으므로, 완전 3차원 (3D) 수압 파쇄 시뮬레이터는 석유 산업에 극히 중대하다.

[0004] 이러한 하나의 시뮬레이터는, 코넬 대학교에서 개발된 것으로 균열 성장의 각 스텝에 대한 경계 조건들의 리메싱 (remeshing) 및 업데이팅에 기초하는, FRANC3D 라고 지칭되는 완전-3D 파쇄 분석 코드이다. 그러나, FRANC3D 는 선형 탄성 파쇄 역학 (linear elastic fracture mechanics; LEFM) 에 기초하고, 이 선형 탄성 파쇄 역학은 일반적으로 경성 (취성) 암석 수압 파쇄들에 대해 적절한 예측들을 제공한다. 그러나, 연성 암석들에 대해, 이를테면, 점토 또는 약하게 연결된 사암들 (낮은 응집력의 입상 재료) 에 대해, LEFM 기반 방법들은 통상적으로, 균열 이전의 연성 파쇄 프로세스 구역이 고려되지 않기 때문에 파쇄 지오메트리에 대한 보수적인 예측들을 제공한다. 또한, FRANC3D 는 파쇄를 둘러싼 매질에 있어서의 유체 연속 방정식을 등한시 한다.

[0005] 일부 주지된 시뮬레이션 제품들은 암석 연성 (이를테면, 연성 헬암) 뿐만 아니라 유체 흐름 연속성을 고려하기 위해 공극압 응집 구역 모델 (cohesive zone model; CZM) 을 이용한다. 이러한 기술은 주입정들 (injection wells) 에 대한 상이한 암석 특성들에 대한 수압 파쇄를 예측하기 위해 원유 및 가스 회사들에 의해 적용되고 있다. 그러나, 균열 경로는, 공극압 응집 요소들을 이용하는 경우 요소 에지와 정렬되어야 하거나 또는 미리 정의되어야 한다.

[0006] 이에 따라, 수압 파쇄를 모델링하는 것은, 균열이 개시되어 임의의 솔루션-의존 경로를 따라 진전시키는 것을 필요로 한다. 종래 방법들의 하나의 단점은, 메시 (mesh) 가 기하학적인 불연속부들에 따르도록 요구된다는 점이다. 균열이 진행함에 따라 메시가 불연속부의 지오메트리와 매칭하도록 연속적으로 업데이트되어야 하기 때문에, 성장하는 균열을 모델링하는 것은 더욱 번잡하다. 또한, 응집 요소들을 이용하는 것은, 응집 요소들이 근원적인 요소 경계들과 정렬해야 하고 균열들이 한 세트의 미리 정의된 경로들을 따라 진전한다는 점에서 제한된다.

## 발명의 내용

### 과제의 해결 수단

[0007] 하나의 양태에 있어서, 컴퓨터 구현 방법은 강화 (enrichment) 영역에서 노드들의 제 1 세트 및 노드들의 제 2 세트의 각 포지션들을 정의하는 단계, 및 노드들의 제 1 세트에서 강화 영역에 대한 커플링된 기공 유체 확산 및 응력 분석 (coupled pore fluid diffusion and stress analysis) 을 수행하는 단계를 포함한다. 그 후에, 분석의 결과로서 노드들의 제 2 세트가 활성화되는지 여부가 결정되고, 그 결과들을 사용자에게 시각적으로 출력된다.

[0008] 또 다른 양태에 있어서, 컴퓨터는 강화 영역에서 노드들의 제 1 세트 및 노드들의 제 2 세트의 각 포지션들을 저장하도록 구성된 메모리 영역을 포함한다. 이 컴퓨터는 또한, 메모리 영역에 커플링되고, 노드들의 제 1 세트에서 강화 영역에 대한 커플링된 기공 유체 확산 및 응력 분석을 수행하고, 분석의 결과로서 노드들의 제 2 세트가 활성화되는지 여부를 결정하며, 결과들을 사용자에게 시각적으로 출력하도록 구성된 프로세서를 포함한다.

[0009] 또 다른 양태에 있어서, 컴퓨터 프로그램 제품은, 컴퓨터 실행가능 컴포넌트들을 갖는 하나 이상의 비일시적 컴퓨터 판독가능 저장 매체를 포함한다. 컴퓨터 실행가능 컴포넌트들은, 프로세서에 의해 실행될 때, 프로세서로 하여금, 강화 영역에서 노드들의 제 1 세트 및 노드들의 제 2 세트의 각 포지션들을 정의하게 하는 정의 컴포넌트를 포함한다. 컴퓨터 실행가능 컴포넌트들은 또한, 프로세서가, 노드들의 제 1 세트에서 강화 영역에 대한 커플링된 기공 유체 확산 및 응력 분석을 수행하도록 하고, 분석의 결과로서 노드들의 제 2 세트가 활성화되는지 여부를 결정하도록 하며, 결과들을 사용자에게 시각적으로 출력하도록 하는 분석 컴포넌트를 포함한다.

## 도면의 간단한 설명

[0010] 본 발명의 하나 이상의 실시형태들의 상세는 첨부 도면 및 다음의 상세한 설명에 제시되어 있다. 본 발명의 다른 특징들, 목적들 및 이점들은 상세한 설명 및 도면, 그리고 청구항들로부터 분명해질 것이다.

도 1 은 확장 유한 요소법 (extended finite element method; XFEM) 을 이용하여 수압 파쇄 시뮬레이션을 시뮬

레이팅하는 일 예시적인 방법을 예시한 흐름도이다.

도 2a 내지 도 2d 는 도 1 의 흐름도에 기술된 것과 같은 강화 영역 내의 유체 흐름 특성들을 예시한 도면들이다.

도 3 은 여기에 기술된 실시형태들을 수행하는데 이용되는 일 예시적인 컴퓨터 네트워크의 개략 블록도이다.

도 4 는 도 3 에 도시된 컴퓨터 디바이스들에 이용되는 일 예시적인 컴퓨터 아키텍처의 개략 블록도이다.

### 발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0011]

여기에 기술된 실시형태들은, 균열 (crack) 표면들을 메싱 (meshing) 하는 것과 연관된 상술된 결점들을 완화시키는 확장 유한 요소법 (extended finite element method; XFEM) 에 관한 것이다. 이들 실시형태들은 로컬 강화 함수들이 유한 요소 근사에 쉽게 포함되도록 하는 단위 분할의 개념에 기초한다. 불연속부들의 존재는 부가적인 자유도들과 관련하여 특수 강화 함수들에 의해 보장된다. 그러나, 여기에 기술된 실시형태들의 하나의 이점은, 이들 실시형태들이 메시가 불연속부들의 지오메트리와 매칭하는 것을 필요로 하지 않는다는 점이다. 이에 따라, 여기에 기술된 실시형태들은, 리메싱의 필요 없이도 임의의 솔루션-의존 경로를 따라 이산 균열의 개시 및 진전을 시뮬레이팅하는 매우 매력적이고 효과적인 방법을 제공한다.

[0012]

또한, 여기에 기술된 실시형태들은 수압 파쇄 (hydraulic fracture) 분석을 위한 공극압 필드를 포함한다. 구체적으로, 공극압 자유도들을 갖는 부가적인 팬텀 노드들이 각 강화 요소의 에지들 상에 도입된다. 각 요소 에지에서의 팬텀 노드는, 이 에지가 균열에 의해 교차될 때까지 활성화되지 않는다. 유체는 압축불가능한 것으로 가정된다. 균열된 요소 표면들의 개방 레이트 뿐만 아니라, 균열된 요소 표면들 내의 그리고 균열된 요소 표면들에 걸친, 유체 누출을 포함한 접선 및 수직 흐름 (tangential and normal flow) 양쪽을 고려한 유체 흐름 연속성이 유지된다. 균열된 요소 표면들에 대한 유체 압력은 강화 요소들에서의 응집 세그먼트들의 견인-분리 거동에 기여하고, 이는 수압 구동 파쇄의 모델링을 가능하게 한다.

[0013]

수압 파쇄 분석을 효과적으로 모델링하기 위한 이전 시도들에 비해 여기에 기술된 실시형태들의 하나의 이점은, 여기에 기술된 실시형태들이 메시가 불연속부들의 지오메트리와 매칭하는 것을 필요로 하지 않는다는 점이다. 이러한 수치 기법은 리메싱의 필요 없이도 임의의 솔루션-의존 경로를 따라 이산 균열의 개시 및 진전을 시뮬레이팅하는 매우 매력적이고 효과적인 방법이다. 이것은 팬텀 노드들과 관련된 응집 세그먼트 방법에 기초한다. 이것은 수압 구동 파쇄에서와 같이 균열된 요소 표면들 내의 유체 흐름 뿐만 아니라 유체 압력 필드에서의 불연속부들의 모델링을 가능하게 한다.

[0014]

도 1 은 공극압 자유도들에 의한 확장 유한 요소법 (XFEM) 을 이용하여 수압 파쇄 시뮬레이션을 시뮬레이팅하는 일 예시적인 방법을 예시한 흐름도 (100) 이다. 구체적으로, 도 1 에 예시된 방법은 공극압 자유도들에 의한 XFEM 을 이용한다. 종래의 유한 요소 방법들을 이용하여 균열과 같은 고정 불연속부들을 모델링하는 것은, 메시가 기하학적인 불연속부들에 따르게 하는 것을 필요로 한다. 그래서, 단일의 점근 필드들을 적절히 캡처하기 위해 균열 선단 주위에 상당한 메시 개선이 요구된다. 성장하는 균열을 모델링하는 것은, 균열이 진행함에 따라 메시가 불연속부의 지오메트리와 매칭하도록 연속적으로 업데이트되어야 하기 때문에 훨씬 더 번잡하다. XFEM 프로세스는 균열 표면들을 메싱하는 것과 연관된 결점들을 완화시킨다. 불연속부들의 존재는 부가적인 자유도들과 관련하여 특수 강화 함수들에 의해 보장된다. 그러나, 유한 요소 프레임워크 및 그 특성들, 이를테면, 성김 및 대칭은 유지된다.

[0015]

파쇄 분석을 위해, 통상적으로, 강화 함수들은 균열 선단 주위의 특이점을 캡처하는 선단 부근 점근 함수들, 및 균열 표면들에 걸친 점프를 변위로 나타내는 불연속 함수로 이루어진다. 단위 분할 강화에 의한 변위 벡터 함수 ( $u$ ) 에 대한 근사는 방정식 (1) 에 나타낸다:

[0016]

$$u = \sum_{I=1}^N N_I(x)[u_I + H(x)a_I + \sum_{\alpha=1}^4 F_{\alpha}(x)b_I^{\alpha}] \quad \text{방정식 (1)}$$

[0017]

여기서  $N_I(x)$  는 통상의 노드 형상 함수들이다; 방정식 (1) 의 우변의 제 1 항 ( $u_I$ ) 은 유한 요소 해 (finite element solution) 의 연속부와 연관된 통상의 노드 변위 벡터이고; 제 2 항은 노드 강화 자유도 벡터 ( $a_I$ ) 와 균열 표면들에 걸친 관련 불연속 점프 함수 ( $H(x)$ ) 의 곱이며; 제 3 항은 노드 강화 자유도 벡터 ( $b_I$ ) 와 관련된 성 점근 균열 선단 함수들 ( $F_{\alpha}(x)$ ) 의 곱이다. 우변의 제 1 항은 모델에서의 모든 노드들에 적용가능하고; 제 2 항은 형상 함수 지원이 균열 내부에 의해 단절된 노드들에 유효하며; 제 3 항은 형상 함수

지원이 균열 선단에 의해 단절된 노드들에게만 이용된다.

[0018] 도 2a 는 균열 표면들에 걸친 불연속 점프 함수 ( $H(x)$ ) 를 예시한 것으로, 이 불연속 점프 함수 ( $H(x)$ ) 는 방정식 (2) 에 의해 주어진다:

$$H(x) = \begin{cases} (x - x^*) \cdot n \geq 0 \text{ 이면 } 1 \\ \text{그렇지 않으면 } -1 \end{cases}$$

방정식 (2)

[0019] 여기서  $x$  는 샘플 (가우스) 포인트이고,  $x^*$  는  $x$  에 가장 가까운 균열 상의 포인트이며,  $n$  은  $x^*$  에서의 균열에 대해 외측으로 수직인 유닛이다. 또한, 도 2a 는 등방성 탄성 재료에서의 점근 균열 선단 함수들 ( $F_a(x)$ ) 을 예시한 것이고, 이 점근 균열 선단 함수들 ( $F_a(x)$ ) 은 방정식 (3) 에 의해 주어진다:

$$F_a(x) = \left[ \sqrt{r} \sin \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \cos \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \sin \theta \sin \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \sin \theta \cos \frac{\theta}{2} \right]$$

방정식 (3)

[0020] 여기서  $(r, \theta)$  는 균열 선단에서 원점을 갖는 극좌표 시스템이고,  $\theta = 0$  은 선단에서의 균열에 접한다.

[0021] 이들 함수는 탄성 정역학의 점근 균열 선단 함수에 걸쳐 있고,  $\sqrt{r} \sin \frac{\theta}{2}$  는 균열 표면에 걸친 불연속부를 고려 한다. 점근 균열 선단 함수들의 이용은 등방성 탄성 재료에서의 균열 모델링에 제한되지 않는다. 동일한 접근법은, 이종재료 계면에 또는 탄소성 면법칙 경화 재료 (elastic-plastic power law hardening material) 에 영향을 미치는, 이종재료 계면을 따르는 균열을 나타내는데 이용될 수 있다. 그러나, 이들 3 개의 경우 각각에 있어서, 상이한 형태들의 점근 균열 선단 함수들은 탄성 재료 변형의 크기 및 균열 위치에 따라 요구된다. 균열 선단 특이점을 정확하게 모델링하는 것은 균열이 진전하는 곳의 진로를 연속적으로 따라가는 것을 필요로 하고, 균열 특이점의 정도가 비등방성 재료에서의 균열의 위치에 의존하기 때문에 번잡하다. 균열들이 진전하는 것을 모델링하는 동안, 균열이 전체 요소에 걸쳐 단일 충분으로 진전한다고 가정할 수 있고, 이 단일 충분은 본 발명이 균열 선단 점근 필드들과 연관된 복잡성들을 회피하도록 한다.

[0022] [0023] 도 1 을 참조하면, 일 예시적인 실시형태에 있어서, 사용자는 분석되어야 하는 강화 영역을 선택하고 (102) 그 특성들을 특정한다. 하나 또는 다수의 기존 균열들은 강화 피처 (enriched feature) 와 연관될 수 있다. 또한, 분석 동안 하나 이상의 균열들은 어떠한 초기 결점 없이 강화 피처에서 개시할 수 있다. 그러나, 일반적으로, 다수의 균열들은, 손상 개시 기준이 동일한 시간 충분으로 다수의 요소들에서 만족되는 경우에만 단일의 강화 피처에서 응집할 수 있다. 그렇지 않으면, 강화 피처에서의 모든 기존 균열들이 주어진 강화 피처의 경계를 통해 진전할 때까지 부가적인 균열들이 응집하지 않을 것이다. 몇몇 균열 응집들은 분석 동안 상이한 위치들에서 순차적으로 발생할 것으로 예상되는 경우, 다수의 강화 피처들이 이 모델에서 특정될 수 있다. 요소가 균열에 의해 교차되는 경우 강화 자유도들이 활성화된다. 응력/변위 또는 변위/공극압 고상 연속체 요소들만이 강화 피처와 연관될 수 있다.

[0024] 그 후에, 사용자는 선택된 강화 영역 내에 초기 균열을 정의한다 (104). 일 예시적인 실시형태에 있어서, 초기 균열은 레벨 노드 세트들을 이용하여 정의된다. 그 후에, 사용자는 균열 개시 및 진전 기준들을 특정한다 (106). 상술된 바와 같이, 여기에 기술된 실시형태들은, 메시가 균열 지오메트리에 따르게 할 필요가 없기 때문에, 균열 지오메트리의 기술시의 확장 유한 요소 분석에서 균열들의 처리를 용이하게 한다. 계면 모션을 분석하고 연산하기 위한 강력한 수치 기법인 레벨 셋 방법은 자연적으로 확장 유한 요소법에 적합하여, 리메싱 없이도 임의의 균열 성장을 모델링하는 것을 가능하게 한다. 균열 지오메트리는, 도 2b 에 예시된 바와 같이, 2개의 거의 직교하는 부호화 거리 함수들에 의해 정의된다. 첫번째  $\phi$  는 균열 표면을 기술한 것인 반면, 두번째  $\psi$  는 직교면을 구성하는데 사용되어, 그 2개의 면들의 교점이 균열 전단을 제공하도록 한다.

[0025]  $n^+$  는 균열 표면에 대한 포지티브 법선을 나타내고;  $m^+$  는 균열 전단에 대한 포지티브 법선을 나타낸다. 경계들 또는 계면들의 명백한 표시가 필요하지 않은데, 그 이유는 이들이 노드 데이터에 의해 완전히 기술되기 때문이다. 균열 지오메트리를 기술하기 위해 노드 당 2개의 부호화 거리 함수들이 일반적으로 요구된다.

[0026] 초기 균열을 정의할 때, 사용자는 임의의 고정 균열, 또는 임의의 솔루션-의존 경로를 따라 진전하는 이산 균열을 모델링할지 여부를 선택한다. 전자는, 균열 선단들 주위의 요소들이 특이점을 캐치하기 위한 점근 함수들로 강화된다는 것과, 균열 내부에 의해 교차된 요소들이 균열 표면들에 걸친 점프 함수로 강화된다는 것을 필요로 한다. 후자는, 균열 진전이 팬텀 노드들과 관련하여 선형 탄성 파쇄 역학 접근법 또는 응집 세그먼트

방법 중 어느 하나의 방법에 의해 모델링되는 것으로 추측한다. 그러나, 옵션들은 상호 배타적이고, 모델에 동시에 특정될 수 없다. 또한, 사용자는 강화 영역을 모델의 영역과 연관시킨다. 이들 영역들 내의 요소들에서의 자유도들만이 특수 함수들에 의해 잠재적으로 강화된다. 이 영역은 균열들에 의해 현재 교차된 요소들, 및 균열들이 진전함에 따라 균열들에 의해 교차될 가능성이 있는 요소들로 이루어져야 한다.

[0027]

사용자 입력들에 응답하여, 컴퓨터는 각 실제 노드의 상부에 그리고 각 요소 에지를 따라 팬텀 노드들을 생성한다. 요소가 균열에 의해 절단되는 경우, 균열 표면들의 압축 거동이 분석 동안 고려된다. 이 거동을 지배하는 공식은 표면 기반의 소규모 슬라이딩 페널티 접촉에 사용된 것들과 매우 유사하다. 선형 탄성 파쇄 역학 접근법에 의한 이동 균열 또는 고정 균열에 의해 교차된 요소에 대해, 균열된 요소의 탄성 응집 강도가 제로인 것으로 가정한다. 그래서, 균열 표면들의 압축 거동은 이 균열 표면들이 접촉하게 될 때 위의 옵션들로 완전히 정의된다. 응집 세그먼트 방법에 의한 이동 균열의 경우, 이 상황은 더욱 복잡하다; 균열 표면들의 견인-분리 응집 거동 및 압축 거동은 균열된 요소에 수반된다. 접촉 수직 방향에 있어서, 표면들 간의 압축 거동을 지배하는 압력-오버클로저 (overclosure) 관계는 응집 거동과 상호작용하지 않는다, 그 이유는 이들 각각은 상이한 접촉 체계에서 표면들 간의 상호작용을 기술하기 때문이다. 압력-오버클로저 관계는 균열이 "닫힌" 때에만 거동을 지배한다; 응집 거동은 균열이 "열린" 때 (즉, 접촉하지 않을 때)에만 접촉 수직 응력에 기여한다. 요소의 탄성 응집 강성이 전단 방향에서 손상되지 않은 경우, 응집 거동이 액티브한 것으로 가정한다. 어떠한 접선 슬립도 사실상 순수하게 탄성인 것으로 가정하고, 전단력을 발생시키는 요소의 탄성 응집 강도에 의해 저지된다. 손상이 정의된 경우, 전단 응력들에 대한 응집 기여는 손상 발달에 따라 저하하기 시작한다. 최대 저하에 일단 도달되었으면, 전단 응력들에 대한 응집 기여는 제로이다. 마찰 모델은, 이것이 정의된 경우, 활성화되어 전단 응력들에 대해 기여하기 시작한다.

[0028]

오리지널 실제 노드들 상에 중첩되는 팬텀 노드들은, 도 2c에 예시된 바와 같이, 균열된 요소들의 불연속부를 나타낸다. 요소가 온전한 경우, 각 팬텀 노드는 그의 대응하는 실제 노드에게 완전히 제약을 받는다. 요소가 균열에 의해 절단되는 경우, 균열된 요소는 2개의 부분들로 분리된다. 각 부분은 균열의 배향에 따라 몇몇 실제 및 팬텀 노드들의 조합에 의해 형성된다. 각 팬텀 노드 및 그의 대응하는 실제 노드는 더 이상 함께 연결되지 않아서 떨어져 이동할 수 있다. 균열 표면 분리의 크기는 균열된 요소의 응집 강도가 제로로 될 때까지 응집성 법칙에 의해 지배되고, 그 후에 그 2개의 부분들은 독립적으로 이동한다. 완전한 보간 베이스들의 세트를 갖기 위해, 실제 도메인 ( $\Omega_0$ )에 속하는 균열된 요소의 부분은 팬텀 도메인 ( $\Omega_p$ )으로 확장된다. 그 후에, 실제 도메인 ( $\Omega_0$ )에서의 변위는 팬텀 도메인 ( $\Omega_p$ )에서의 노드들에 대한 자유도들을 이용함으로써 보간될 수 있다. 단순히 실제 노드들의 측면으로부터 균열까지의 영역, 즉,  $\Omega_0^+$ 와  $\Omega_0^-$ 만을 통해 통합함으로써 변위 필드에서의 점프가 실현된다.

[0029]

일부 실시형태에 있어서, 상술된 팬텀 노드들과 관련된 응집 세그먼트 방법은 수압 구동 파쇄를 모델링하도록 확장된다. 이 경우, 균열된 요소에서의 변위 및 유체 압력의 불연속부들을 나타내기 위해 오리지널 실제 노드들 상에 중첩되는 팬텀 노드들과 관련된 균열된 요소 표면들 내의 유체 흐름을 모델링하기 위해, 공극압 자유도들을 갖는 부가적인 팬텀 노드들이 각 강화 요소의 에지를 상에 도입된다. 각 요소 에지에서의 팬텀 노드는, 이 에지가 균열에 의해 교차될 때까지 활성화되지 않는다. 균열된 요소들에서의 기공 유체 (pore fluid)의 흐름 패턴들이 도 2d에 도시되어 있다. 이 유체는 압축불가능한 것으로 가정한다. 균열된 요소 표면들의 개방의 레이트 뿐만 아니라, 균열된 요소 표면들 내의 그리고 그 균열된 요소 표면들에 걸친 접선 및 수직 흐름 양쪽을 고려한 유체 흐름 연속성이 유지된다. 균열된 요소 표면들 상의 유체 압력은 강화된 요소들에서의 응집 세그먼트들의 견인-분리 거동에 기여하고, 이는 수압 거동 파쇄의 모델링을 가능하게 한다.

[0030]

도 1을 다시 참조하면, 일 예시적인 실시형태에 있어서, 새로운 증분이 검토된다 (108). 각 증분에 있어서, 집중된 유체 흐름이 강화 영역을 통해 시뮬레이팅된다 (110). 하나 이상의 균열들을 갖는 강화 영역을 통해 유체 흐름을 시뮬레이팅하는 것은, 사용자로 하여금, 강화 영역이 유체에 의해 전달된 부하들에 의해 얼마나 손상될 것인지를 결정할 수 있게 한다. 예를 들어, 손상 모델링은, 강화된 요소의 저하 및 궁극적인 실패의 시뮬레이션을 가능하게 한다. 실패 메커니즘은 2개의 성분들: 손상 개시 기준 및 손상 발달 법칙으로 이루어진다. 초기 응답은 상술된 바와 같이 선형적인 것으로 가정한다. 그러나, 손상 또는 파쇄 개시 기준이 일단 만족되면 (112), 사용자-정의의 손상 발달 법칙에 따라 손상이 발생할 수 있다. 강화된 요소는 순수한 압축 하에서는 손상을 경험하지 않는다. 강화된 요소에서의 응집 거동에 대한 견인-분리 응답의 손상은, 종래 재료들에 이용되는 동일한 일반 프레임워크 내에서 정의된다. 그러나, 견인-분리 거동을

갖는 응집 요소들과는 달리, 사용자는 강화된 요소에서 손상되지 않은 견인-분리 거동을 특정할 필요가 없다.

[0031] 파쇄 기준들이 만족되는지 여부를 결정함에 있어서, 하나의 변수는 균열 개시이고, 이 균열 개시는 강화된 요소에서의 응집 응답의 저하의 시작을 지칭한다. 저하의 프로세스는 응력을 또는 변형들이 특정된 균열 개시 기준들을 만족할 때 시작한다. 균열 개시 기준들은, 최대 주응력 기준, 최대 주변형 기준, 최대 공칭 응력 기준, 최대 공칭 변형 기준, 2차 견인-상호작용 기준, 2차 분리-상호작용 기준, 및 사용자-정의의 손상 개시 기준을 포함하지만, 이에 한정되지 않는다. 또한, 사용자는 허용오차를 특정하여, 파쇄 기준들 중 하나 이상이 이 허용오차를 초과하는 경우, 새로운 균열이 도입되도록 할 수도 있다.

[0032] 최대 주응력 기준은 방정식 (4)에 나타낸 바와 같이 나타낼 수 있다:

$$f = \left\{ \frac{\langle \sigma_{max} \rangle}{\sigma_{max}^0} \right\}$$

방정식 (4)

$$\sigma_{max}^0$$

[0033] 여기서  $\sigma_{max}^0$  는 최대 허용가능한 주응력을 나타낸다. 심볼 < >은 통상적인 해석으로 매콜리 꺾음 팔호를 나타낸다 ( $\sigma_{max} < 0$  이면  $\langle \sigma_{max} \rangle = 0$ 이고,  $\sigma_{max} \geq 0$  이면  $\langle \sigma_{max} \rangle = \langle \sigma_{max} \rangle$ 이다).

매콜리 꺾음 팔호들은 순수 압축 응력 상태가 손상을 개시시키지 않는다는 것을 의미하기 위해 사용된다. 손상은 최대 주응력 비율이 (위의 표현에서 정의된 바와 같이) 1의 값에 도달할 때 개시하는 것으로 가정한다.

[0035] 최대 주변형 기준은 방정식 (5)에 나타낸 바와 같이 나타낼 수 있다:

$$f = \left\{ \frac{\langle \varepsilon_{max} \rangle}{\varepsilon_{max}^0} \right\}$$

방정식 (5)

$$\varepsilon_{max}^0$$

[0036] 여기서  $\varepsilon_{max}^0$  는 최대 허용가능한 주변형을 나타내고, 매콜리 꺾음 팔호들은 순수 압축 변형이 손상을 개시시키지 않는다는 것을 의미한다. 손상은 최대 주변형 비율이 (위의 표현에서 정의된 바와 같이) 1의 값에 도달할 때 개시하는 것으로 가정한다.

[0038] 최대 공칭 응력 기준은 방정식 (6)에 나타낸 바와 같이 나타낼 수 있다:

$$f = \max \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0}, \frac{t_t}{t_t^0} \right\}$$

방정식 (6)

[0040] 여기서, 공칭 견인 응력 벡터 ( $t$ )는 3개의 성분들 (2차원 문제들에서는 2개)로 이루어진다.  $t_n$ 은 균열될 가능성이 있는 표면에 수직인 성분이고,  $t_s$  및  $t_t$ 는 균열될 가능성이 있는 표면에 대한 2개의 전단 성분들이다.

사용자에 의해 특정된 것에 따라, 균열될 가능성이 있는 표면은 요소 로컬 1방향 또는 요소 로컬 2방향 중 어느 하나에 칙교한다. 여기서,  $t_n^0$ ,  $t_s^0$ , 및  $t_t^0$ 는 공칭 응력의 피크 값들을 나타낸다. 심볼 < >은 통상적인 해석으로 매콜리 꺾음 팔호를 나타낸다. 매콜리 꺾음 팔호들은 순수 압축 응력 상태가 손상을 개시시키지 않는다는 것을 의미하기 위해 사용된다. 손상은 최대 공칭 응력 비율이 (위의 표현에서 정의된 바와 같이) 1의 값에 도달할 때 개시하는 것으로 가정한다.

[0041] 최대 공칭 변형 기준은 방정식 (7)에 나타낸 바와 같이 나타낼 수 있다:

$$f = \max \left\{ \frac{\langle \varepsilon_n \rangle}{\varepsilon_n^0}, \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s^0}, \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_t^0} \right\}$$

방정식 (7)

[0043] 여기서, 손상은 최대 공칭 변형 비율이 (위의 표현에서 정의된 바와 같이) 1의 값에 도달할 때 개시하는 것으로 가정한다.

[0044] 2차 공칭 응력 기준은 방정식 (8)에 나타낸 바와 같이 나타낼 수 있다:

$$f = \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_t}{t_t^0} \right\}^2$$

방정식 (8)

[0046] 여기서, 손상은 응력 비율을 수반한 2차 상호작용 함수가 (위의 표현에서 정의된 바와 같이) 1의 값에 도달할 때 개시하는 것으로 가정한다.

[0047] 2차 공칭 변형 기준은 방정식 (9)에 나타낸 바와 같이 나타낼 수 있다:

$$f = \left\{ \frac{\langle \varepsilon_n \rangle}{\varepsilon_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_t^0} \right\}^2 \quad \text{방정식 (9)}$$

[0048] 여기서, 손상은 공칭 변형 비율을 수반한 2차 상호작용 함수가 (위의 표현에서 정의된 바와 같이) 1의 값에 도달할 때 개시하는 것으로 가정한다.

[0049] 하나 이상의 파쇄 기준들이 만족되는 경우 (단계 112에서 예), 새로운 팬텀 노드들이 활성화된다 (114). 구체적으로, 하나 이상의 파쇄 기준들이 만족되면, 컴퓨터는 특정 팬텀 노드와 그의 대응하는 실제 노드가 더 이상 함께 연결되어 있지 않다고 결정한다, 즉, 이 2개의 노드들이 더 이상 동일한 좌표를 갖고 있지 않거나 또는 더 이상 강화 영역 내에 동일한 공간을 차지하고 있지 않다고 결정한다. 균열 표면 분리의 크기는 응집 성 법칙에 의해 지배된다. 또한, 강화 영역의 에지들에서의 부가적인 팬텀 노드들은 공극암 자유도들로 활성화된다 (114). 이것은 강화 영역의 표면들 내의 또는 그 강화 영역의 표면들을 따르는 유체 흐름 연속성을 보장한다. 하나 이상의 파쇄 기준들이 만족되지 않는 경우 (단계 112에서 아니오), 팬텀 노드들은 활성화되지 않는다.

[0050] 일 예시적인 실시형태에 있어서, 팬텀 노드들이 활성화되었는지 여부에 관계없이, 하나 이상의 평형 (equilibrium) 방정식들이 그 후에 컴퓨터에 의해 해석된다 (116). 강화된 요소에서 응집 거동을 정의하는 구성 방정식들의 다양한 정규화는 일부 수렴 어려움들을 극복하기 위해 이용될 수도 있다. 다양한 정규화 감소는, 접선 강성 매트릭스가, 충분히 작은 시간 증분 동안 포지티브로 한정되도록 한다. 균열된 요소 표면들 내의 접선 흐름은 뉴튼 모델 또는 면법칙 모델 중 어느 하나에 의해 모델링될 수 있다. 디폴트로, 균열된 요소 표면들 내에 어떠한 기공 유체의 접선 흐름도 존재하지 않는다. 접선 흐름을 허용하기 위해, 사용자는 기공 유체 재료 정의와 관련하여 캡 흐름 특성을 정의한다. 뉴튼 유체의 경우, 체적 유량 밀도 벡터는 방정식 (10)에 의해 주어진다:

$$q_d = -k_t \nabla p \quad \text{방정식 (10)}$$

[0051] 여기서  $k_t$ 는 접선 투자율 (유체 흐름에 대한 저항)이고,  $\nabla p$ 는 균열된 요소 표면들을 따르는 압력 구배이며,  $d$ 는 균열된 요소 표면들의 개구이다. 접선 투자율, 또는 흐름에 대한 저항은 방정식 (11)로 나타낸 레이놀즈 방정식에 따라 정의될 수 있다:

$$k_t = \frac{d^3}{12\mu} \quad \text{방정식 (11)}$$

[0052] 여기서  $\mu$ 는 유체 점도이고,  $d$ 는 균열된 요소 표면들의 개구이다.  $k_t$ 의 값에 대한 상한이 또한 특정될 수도 있다. 면법칙 유체의 경우, 구성 관계는 방정식 (12)에 나타낸 바와 같이 정의된다:

$$\tau = K \dot{\gamma}^\alpha \quad \text{방정식 (12)}$$

[0053] 여기서  $\tau$ 는 전단 응력이고,  $\dot{\gamma}$ 는 전단 변형 비율이고,  $K$ 는 유체 농도이며,  $\alpha$ 는 면법칙 계수이다. 이에 따라, 접선 체적 유량 밀도는 방정식 (13)에 나타낸 바와 같이 정의된다:

$$q_d = - \left( \frac{2\alpha}{1+2\alpha} \right) \left( \frac{1}{K} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \left( \frac{d}{2} \right)^{\frac{1+2\alpha}{\alpha}} \|\nabla p\|^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} \nabla p \quad \text{방정식 (13)}$$

[0054] 여기서  $d$ 는 균열된 요소 표면들의 개구이다.

[0055] 또 다른 예로서, 그리고 균열된 요소 표면들에 걸친 수직 흐름에 대해, 기공 유체 재료에 대한 유체 누출 계수가 정의된다. 이 계수는 균열된 요소 에지들과 균열된 요소 표면들에 위치된 팬텀 노드들 간의 압력-흐름 관계를 정의한다. 유체 누출 계수들은 균열된 요소 표면들 상의 재료의 유한 층의 투자율로서 해석될 수 있

다. 수직 흐름은 방정식 (14) 및 방정식 (15)에 나타낸 바와 같이 정의된다:

[0061]  $q_t = c_t(p_i - p_t)$  방정식 (14)

[0062]  $q_b = c_b(p_i - p_b)$  방정식 (15)

[0063] 여기서  $q_t$  와  $q_b$  는 균열된 요소의 상부면과 바닥면 각각으로의 유량들이고;  $p_i$  는 균열된 요소 에지에 위치된 팬텀 노드에서의 압력이며;  $p_t$  와  $p_b$  는 균열된 요소의 상부면과 바닥면 각각에 대한 공극압들이다. 또한, 누출 계수들은 온도와 필드 변수들의 함수들로서 정의될 수도 있다.

[0064] 평형 방정식들의 출력 결과들이 사용자에게 제시된다 (118). 일 예시적인 실시형태에 있어서, 이 결과들은, 예를 들어, 디스플레이 디바이스를 통해 사용자에게 시각적으로 출력된다. 이 결과들의 표현 (118) 후에 또 는 그 동안, 분석이 완료되었는지 여부가 결정된다 (120). 예를 들어, 컴퓨터는 검사되어야 하는 잔여 증분들이 존재하는지 여부 (110) 를 결정한다 (120). 분석이 완료되지 않은 경우 (단계 120에서 아니오), 프로세스는 새로운 증분을 시작하고 (108) 이전 단계들 110, 112, 114, 116, 및 118 을 수행한다. 각 증분이 검사되었다는 것을 의미하는, 분석이 완료된 경우 (단계 120에서 예), 프로세스가 종료된다 (122).

[0065] 도 3 은 공극압 자유도에 의한 XFEM 방법을 이용하여 수압 파쇄 시뮬레이션을 시뮬레이팅하는데 이용하기 위한, 및/또는 상술된 프로세스들 및/또는 상술된 그 프로세스들과 관련될 수도 있는 부가적인 프로세스들을 수행하는데 이용하는 일 예시적인 컴퓨터 네트워크 (300) 의 개략 블록도이다. 일 예시적인 실시형태에 있어서, 메모리 영역 (302) 은, 데이터, 이를테면, 재료 파쇄 특성들, 강화 영역 특성들, 실제 또는 팬텀 노드 좌표, 강화 영역에 대한 파쇄 기준들, 강화 영역 및/또는 균열 영역들에 대한 메시 데이터, 유체 흐름 데이터, 평형 방정식 들 및 관련 데이터, 또는 임의의 다른 적합한 데이터를 저장하는데 이용하기 위한 하나 이상의 저장 디바이스들 (304) 을 포함한다. 일부 실시형태에 있어서, 메모리 영역 (302) 은 서버 시스템 (306) 에 커플링되고, 이 서버 시스템 (306) 은 차례로 네트워크 (310) 를 통해 관리자 시스템 및/또는 사용자 시스템과 같은 클라이언트 시스템들 (308) 에 커플링된다. 저장 디바이스들 (304) 은 하나 이상의 데이터베이스들로서 구현될 수도 있거나, 단일의 또는 다수의 지리적 사이트에 위치될 수도 있거나, 또는 서버 시스템 (306) 과 통합될 수도 있다.

[0066] 인식될 수 있는 바처럼, 네트워크 (310) 는, 인터넷과 같은 공개 네트워크, 또는 LAN 또는 WAN 네트워크와 같은 사설 네트워크, 또는 이들의 임의의 조합일 수도 있고 또한 PSTN 또는 ISDN 서브-네트워크들을 포함할 수 있다.

네트워크 (310) 는 또한, 이더넷 네트워크와 같이 유선일 수 있거나, 또는 EDGE, 3G 및 4G 무선 셀룰러 시스템들을 포함하는 셀룰러 네트워크와 같이 무선일 수 있다. 무선 네트워크는 또한 WiFi, Bluetooth, 또는 알려진 임의의 다른 무선 형태의 통신일 수 있다. 따라서, 네트워크 (310) 는 단순히 예시적이고 결코 본 발명의 범위를 제한하지 않는다.

[0067] 클라이언트 시스템들 (308) 은 도 4 를 참조하여 아래에서 설명된 것과 같은 임의의 적합한 컴퓨터 아키텍처 또는 알려진 임의의 다른 컴퓨팅 아키텍처일 수 있다. 또한, 서버 시스템 (306) 은 상술된 프로세스들 및/또는 상술된 그 프로세스들과 관련될 수도 있는 임의의 부가적인 프로세스들을 수행하도록 구성된다는 것을 이해해야 한다.

[0068] 서버 시스템 (306) 은 상술된 프로세스들을 실행하기 위한 컴퓨터 판독가능 명령들을 저장하고 이를 명령들을 네트워크 (310) 를 통하여 클라이언트 시스템들 (308) 에 제공한다. 또한, 서버 시스템 (306) 은 또한, 클라이언트 시스템들 (308) 이 상술된 프로세스들을 수행하도록 클라이언트 시스템들 (308) 에 필요할 때 메모리 영역 (302) 으로부터 데이터를 제공할 수 있다. 이와 같이, 도 3 은 클라우드 컴퓨팅, 분산 컴퓨팅 등을 통 한 컴퓨터 시스템 (300) 의 구현들을 포함한다.

[0069] 동작 동안, 서버 시스템 (306) 및 클라이언트 시스템들 (308) 은 도 1에서 상술된 단계들을 수행하도록 상호작용한다. 예를 들어, 데이터는 사용자에 의해 클라이언트 시스템 (308) 에 입력되고 네트워크 (310) 를 통해 서버 시스템 (306) 에 송신될 수도 있다. 데이터는 그 후에 메모리 영역 (302) 에 저장되어 서버 시스템 (306) 및/또는 클라이언트 시스템 (308) 에 의한 필요에 따라 액세스될 수도 있다. 일부 실시형태에 있어서, 서버 시스템 (306) 은 상술된 분석 단계들, 이를테면, 강화 영역을 통한 집중된 유체 흐름들의 시뮬레이션, 강화 영역 내의 하나 이상의 파쇄 기준들이 만족되는지 여부를 결정하는 것, 파쇄 기준들이 만족된 경우 필요에 따라 팬텀 노드들을 활성화시키는 것, 평형 방정식들을 해석하는 것, 및 사용자에게 제시를 위해 분석 결과들을 클라이언트 시스템 (308) 에 송신하는 것을 수행한다. 분석 결과들을 제시하는 것에 부가하여, 클

라이언트 시스템 (308) 은 분석되어야 하는 강화 영역을 선택하고, 강화 영역 내의 균열의 초기 메시를 정의하며, 균열 개시 및 진전 기준들을 특정하도록 사용자에 의해 이용될 수도 있다. 클라이언트 시스템 (308) 은 이 데이터를 서버 시스템 (308) 에 송신하여 강화 영역 내의 균열 개시 및 진전 문제들을 분석하는데 이용하도록 한다.

[0070] 도 4 는 (각각 도 3 에 도시된) 서버 시스템 (306) 및/또는 클라이언트 시스템들 (308) 에의 사용을 위한 일 예시적인 컴퓨터 아키텍쳐 (400) 의概략 블록도이다.

[0071] 일 예시적인 실시형태에 있어서, 컴퓨터 아키텍쳐 (400) 는 상술된 프로세스들 및/또는 상술된 그 프로세스들과 관련될 수도 있는 임의의 부가적인 프로세스들을 수행하는 하나 이상의 프로세서들 (402) (CPU) 을 포함한다.

용어 "프로세서" 는 일반적으로, 시스템들 및 마이크로제어기들, RISC (reduced instruction set circuit), ASIC (application-specific integrated circuits), 프로그램가능 로직 회로, 및/또는 여기에 기술된 기능들을 실행할 수 있는 임의의 다른 회로 또는 프로세서를 포함하는 임의의 프로그램가능 시스템을 지칭한다는 것을 이해해야 한다. 위의 예들은 단지 예시적인 것일 뿐이고 따라서 용어 "프로세서" 의 정의 및/또는 의미를 결코 제한하도록 의도되지 않았다.

[0072] 상술된 프로세스들 및/또는 상술된 그 프로세스들에 관련될 수도 있는 임의의 부가적인 프로세스들의 단계들은, 예를 들어, 시스템 버스 (406) 에 의해 프로세서 (402) 에 동작적으로 및/또는 통신가능하게 커플링되는 메모리 영역 (404) 에 컴퓨터 실행가능 명령들로서 저장될 수도 있다. 여기서 사용된 "메모리 영역 (memory area)" 은 일반적으로, 공극압 자유도에 의한 XFEM 방법을 이용하여 수압 파쇄 시뮬레이션을 시뮬레이팅하는 것을 돋기 위해, 및/또는 상술된 프로세스들 및/또는 상술된 그 프로세스들에 관련될 수도 있는 부가적인 프로세스들을 수행하는데 이용하기 위해 하나 이상의 프로세서들에 의해 실행가능한 비일시적 프로그램 코드 및 명령들을 저장하기 위한 임의의 수단을 지칭한다. 메모리 영역 (404) 은 하나, 또는 하나 이상의 형태들의 메모리를 포함할 수도 있다. 예를 들어, 메모리 영역 (404) 은, 비휘발성 RAM, 자기 RAM, 강유전성 RAM 및/또는 다른 형태들의 RAM 을 포함할 수 있는 RAM (random-access memory) (408) 을 포함할 수도 있다. 메모리 영역 (404) 은 또한 ROM (read-only memory) (410) 및/또는 플래시 메모리 및/또는 EEPROM (electrically-programmable read-only memory) 을 포함할 수도 있다. 임의의 다른 적합한 자기, 광학 및/또는 반도체 메모리, 이를테면 HDD (hard-disk drive) (412) 는, 단독으로 또는 다른 형태들의 메모리와 조합하여, 메모리 영역 (404) 에 포함될 수도 있다. HDD (412) 는 또한 프로세서 (402) 로 메시지들을 송신하고 프로세서 (402) 로부터 메시지들을 수신하는데 이용하기 위한 디스크 제어기 (414) 에 커플링될 수도 있다. 또한, 메모리 영역 (404) 은 또한, 분리식 또는 착탈식 메모리 (416), 이를테면 적합한 카트리지 디스크, CD-ROM, DVD, 또는 USB 메모리일 수도 있거나 또는 이를 포함할 수도 있다. 위의 예들은 단지 예시적인 것일 뿐이고 따라서 용어 "메모리 영역" 의 정의 및/또는 의미를 결코 제한하도록 의도되지 않았다.

[0073] 컴퓨터 아키텍쳐 (400) 는 또한, 디스플레이 제어기 (420) 에 동작적으로 커플링되는 것과 같이 커플링되는 디스플레이 디바이스 (418) 를 포함한다. 디스플레이 제어기 (420) 는 디스플레이 디바이스 (418) 에 의한 디스플레이를 위해 시스템 버스 (406) 를 통해 데이터를 수신한다. 디스플레이 디바이스 (418) 는, 비제한적으로, 모니터, 텔레비전 디스플레이, 플라즈마 디스플레이, LCD (liquid crystal display), LED (light-emitting diodes) 에 기초한 디스플레이, OLED (organic LEDs) 에 기초한 디스플레이, 폴리미 LEDs 에 기초한 디스플레이, 표면 전도 전자 방출기들에 기초한 디스플레이, 투영 및/또는 반사 이미지를 포함하는 디스플레이, 또는 임의의 다른 적합한 전자 디바이스 또는 디스플레이 메커니즘일 수도 있다. 또한, 디스플레이 디바이스 (418) 는 관련 터치스크린 제어기 (420) 를 갖는 터치스크린을 포함할 수도 있다. 위의 예들은 단지 예시적인 것일 뿐이고 따라서 용어 "디스플레이 디바이스" 의 정의 및/또는 의미를 결코 제한하도록 의도되지 않았다.

[0074] 또한, 컴퓨터 아키텍쳐 (400) 는 (도 4 에 도시되지 않은) 네트워크와 통신하는데 이용하기 위한 네트워크 인터페이스 (422) 를 포함한다. 또한, 컴퓨터 아키텍쳐 (400) 는 하나 이상의 입력 디바이스들, 이를테면, 키보드 (424) 및/또는 포인팅 디바이스 (426), 이를테면, 롤러 볼, 마우스, 터치패드 등을 포함한다. 입력 디바이스들은, 시스템 버스 (406) 에 더 커플링되는, I/O (input/output) 인터페이스 (428) 에 커플링되고 그에 의해 제어된다.

[0075] 디스플레이 디바이스 (418), 키보드 (424), 포인팅 디바이스 (426) 및 디스플레이 제어기 (420), 디스크 제어기 (414), 네트워크 인터페이스 (422) 및 I/O 인터페이스 (428) 의 일반적인 피쳐들 및 기능성의 설명은 이들 피쳐들이 알려져 있으므로 간결성을 위해 여기에서는 생략된다.

[0076]

동작 동안, 프로세서 (402) 는 도 1 에서 상술된 단계들을 수행한다. 예를 들어, 데이터는 사용자에 의해 키보드 (424) 및/또는 포인팅 디바이스 (426) 를 통해 입력될 수도 있다. 데이터는 그 후에 메모리 영역 (404) 에 저장되어 프로세서 (402) 에 의한 필요에 따라 액세스될 수도 있다. 일부 실시형태에 있어서, 프로세서 (402) 는 상술된 분석 단계들, 이를테면, 강화 영역을 통한 집중된 유체 흐름들의 시뮬레이션, 강화 영역 내의 하나 이상의 파쇄 기준들이 만족되는지 여부를 결정하는 것, 파쇄 기준들이 만족된 경우 필요에 따라 팬텀 노드들을 활성화시키는 것, 평형 방정식들을 해석하는 것, 및 디스플레이 디바이스 (418) 로 하여금 사용자에게 분석 결과들을 디스플레이하게 하는 것을 수행한다. 분석 결과들을 제시하는 것에 부가하여, 프로세서 (402) 는, 키보드 (424) 및/또는 포인팅 디바이스 (426) 를 통한 사용자 입력들 모두에 기초하여, 분석되어야 하는 강화 영역을 선택하고, 강화 영역 내의 균열의 초기 메시를 정의하며, 균열 개시 및 진전 기준들을 특정할 수도 있다.

[0077]

고체들 내의 그리고 그 고체들 사이의 유체 흐름을 시뮬레이팅 또는 모델링하는데 이용하기 위한 시스템들, 방법들, 장치들 및 컴퓨터 프로그램 제품들의 예시적인 실시형태들이 상세히 상술되어 있다. 시스템들, 방법들, 장치들 및 컴퓨터 프로그램 제품들은 여기에 기술된 특정 실시형태들에 제한되는 것이 아니라, 오히려 방법들의 동작들 및/또는 시스템 및/또는 장치의 컴포넌트들은 여기에 기술된 다른 동작들 및/또는 컴포넌트들로부터 독립적으로 그리고 따로 이용될 수도 있다. 또한, 기술된 동작들 및/또는 컴포넌트들이 또한 다른 시스템들, 방법들, 및/또는 장치들에서 정의되거나, 또는 그들과 조합하여 이용될 수도 있고, 여기에 기술된 시스템들, 방법들, 및 저장 매체들에만 실시하는 것으로 제한되지 않는다.

[0078]

비록 본 발명은 일 예시적인 시뮬레이션 시스템 환경과 관련하여 기술되었지만, 본 발명의 실시형태들은 많은 다른 범용 또는 전용 시뮬레이션 시스템 환경들 또는 구성 (configuration) 들로 동작된다. 시뮬레이션 시스템 환경은 본 발명의 임의의 양태의 사용 또는 기능성의 범위에 대해 어떠한 제한도 시사하도록 의도되지 않았다. 또한, 시뮬레이션 시스템 환경은 예시적인 동작 환경에서 예시된 컴포넌트들 중 임의의 하나 또는 조합에 관한 임의의 의존성 또는 요건을 갖는 것으로 해석되지 않아야 한다. 본 발명의 양태들에 사용하는데 적합할 수도 있는 잘 알려진 시뮬레이션 시스템들, 환경들 및/또는 구성들의 예들은, 비한정적으로, 개인용 컴퓨터, 서버 컴퓨터, 휴대용 또는 램프 디바이스들, 멀티프로세서 시스템들, 마이크로프로세서 기반 시스템들, 셋톱 박스들, 프로그램가능 가전 제품들, 모바일 전화들, 네트워크 PC들, 미니컴퓨터들, 메인프레임 컴퓨터들, 위의 시스템들 또는 디바이스들 중 임의의 것을 포함하는 분산 컴퓨팅 환경들 등을 포함한다.

[0079]

본 발명의 실시형태들은, 하나 이상의 컴퓨터들 또는 다른 디바이스들에 의해 실행된, 프로그램 컴포넌트들 또는 모듈들과 같은 컴퓨터 실행가능 명령들의 일반 맥락에서 기술될 수도 있다. 본 발명의 양태들은 임의 수와 조직의 컴포넌트들 또는 모듈들로 구현될 수도 있다. 예를 들어, 본 발명의 양태들은 도면들에 예시되고 여기에 기술된 특정 컴퓨터 실행가능 명령들 또는 특정 컴포넌트들 또는 모듈들에 제한되지 않는다. 본 발명의 대안의 실시형태들은, 여기에 예시되고 기술된 것보다 더 많거나 또는 더 적은 기능성을 갖는 상이한 컴퓨터 실행가능 명령들 또는 컴포넌트들을 포함할 수도 있다.

[0080]

일 예시적인 컴퓨터 프로그램 제품은, 예를 들어, 컴퓨터 실행가능 컴포넌트들을 갖는 하나 이상의 비일시적 컴퓨터 관독가능 저장 매체를 포함한다. 컴퓨터 실행가능 컴포넌트들은, (도 4 에 도시된) 프로세서 (402) 와 같은 프로세서에 의해 실행될 때, 이 프로세서로 하여금, 강화 영역에서 노드들의 제 1 세트 및 노드들의 제 2 세트의 각 포지션들을 정의하게 하는 정의 컴포넌트를 포함한다. 일 예시적인 실시형태에 있어서, 컴퓨터 실행가능 컴포넌트들은 또한, 이 프로세서가 노드들의 제 1 세트에서 강화 영역에 대한 커플링된 기공 유체 확산 및 응력 분석을 수행하도록 하고, 노드들의 제 2 세트가 분석 결과로서 활성화되는지 여부를 결정하도록 하며, 그 결과들을 사용자에게 시각적으로 출력하도록 하는 분석 컴포넌트를 포함한다.

[0081]

일부 실시형태에 있어서, 정의 컴포넌트는 또한, 프로세서로 하여금 강화 영역을 정의하게 한다. 또한, 일부 실시형태에 있어서, 정의 컴포넌트는 프로세서로 하여금 강화 영역 내의 균열의 초기 메시를 정의하게 한다. 또한, 일부 실시형태에 있어서, 정의 컴포넌트는 프로세서로 하여금 강화 영역 내의 균열 개시 기준들 및 균열 진전 기준들을 정의하게 한다.

[0082]

일부 실시형태에 있어서, 분석 컴포넌트는, 프로세서로 하여금, 강화 영역의 특성들에 기초하여 파쇄 기준을 정의하게 하고, 파쇄 기준이 분석 동안 만족되는지 여부를 결정하게 한다. 또한, 일부 실시형태에 있어서, 분석 컴포넌트는 프로세서로 하여금 하나 이상의 평형 방정식들에 대한 해들을 연산하게 하고, 하나 이상의 평형 방정식들은 노드들의 제 2 세트가 분석 결과로서 활성화되는지 여부에 기초한다. 또한, 일부 실시형태에 있어서, 분석 컴포넌트는 프로세서로 하여금 강화 영역 내의 유체 압력 필드 및 유체 흐름에서의 불연속부들을 모

델링하게 한다.

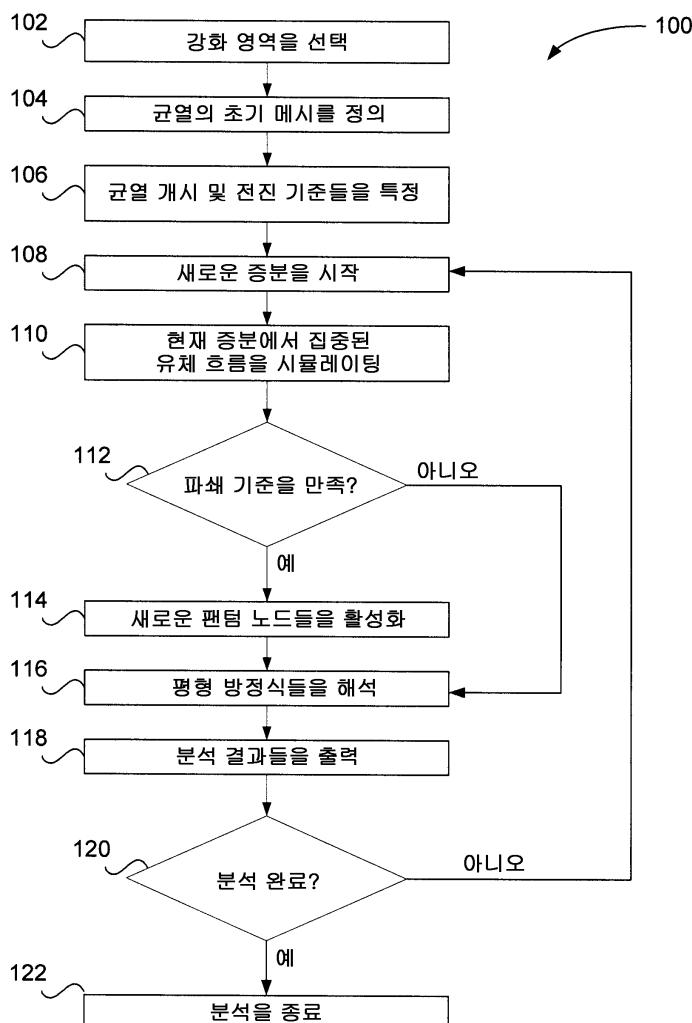
[0083] 여기에 예시되고 기술된 본 발명의 실시형태들에서의 동작들의 실행 또는 성능의 순서 (order) 는, 달리 특정되지 않으면, 필수적이지 않다. 즉, 동작들은, 달리 특정되지 않으면 임의의 순서로 수행될 수도 있고, 본 발명의 실시형태들은 여기에 개시된 것들보다 부가적인 또는 더 적은 동작들을 포함할 수도 있다. 예를 들어, 다른 동작 전에, 동시에, 또는 후에 특정 동작을 실행 또는 수행하는 것은 본 발명의 양태들의 범위 내에 있는 것으로 고려된다.

[0084] 본 발명의 양태들 또는 그의 실시형태들의 요소들을 도입할 때, 관사 "a", "an", "the", 및 "상기" 는 하나 이상의 요소들이 있다는 것을 의미하도록 의도된다. 용어 "포함하는", "구비하는" 및 "갖는" 은, 포괄적이고 열거된 요소들 이외의 부가적인 요소들이 있을 수도 있다는 것을 의미하도록 의도된다.

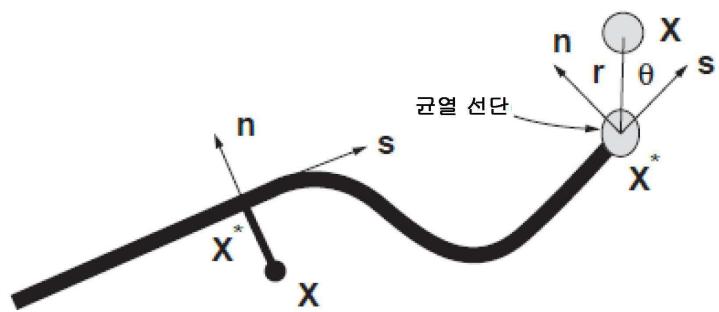
[0085] 이 기재된 상세한 설명은, 최선의 모드를 포함하는, 예들을 사용하여 본 발명을 개시하고, 또한 당업자로 하여금, 임의의 디바이스들 또는 시스템들의 제조 및 사용 그리고 임의의 포함된 방법들의 수행을 포함하는, 본 발명의 실시를 가능하게 한다. 본 발명의 특허가능 범위는 청구항들에 의해 정의되고, 당업자에 떠오르는 다른 예들을 포함할 수도 있다. 그러한 다른 예들은, 청구항들의 문언과는 상이하지 않은 구조적 요소들을 갖는 경우 또는 그들이 청구항들의 문언과는 비실질적인 차이를 갖는 등가의 구조적 요소들을 포함하는 경우 청구항들의 범위 내에 있는 것으로 의도된다.

## 도면

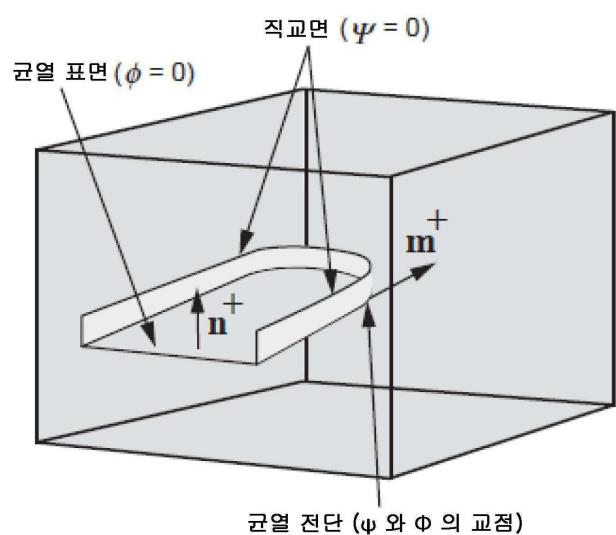
### 도면1



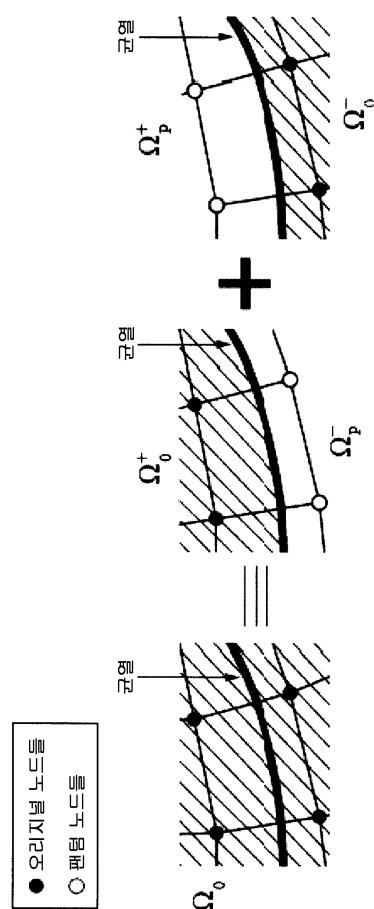
도면2a



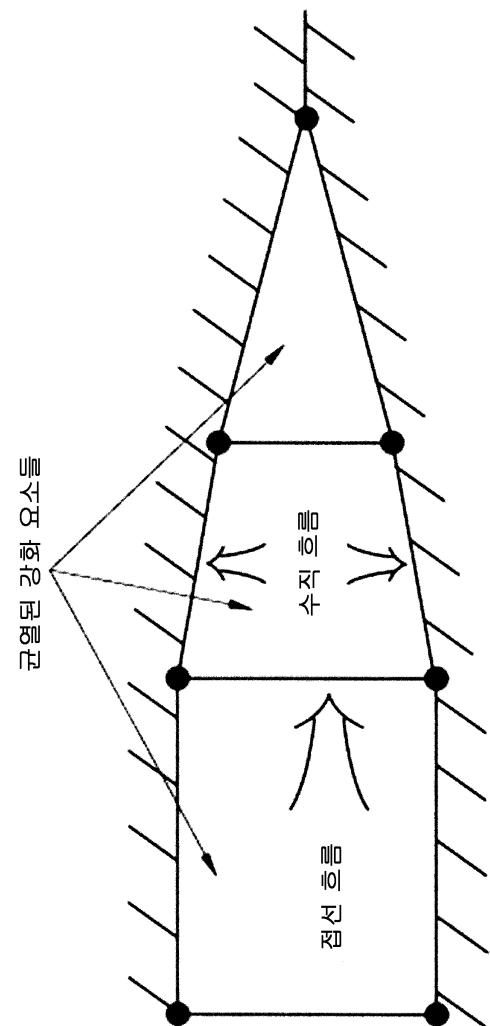
도면2b



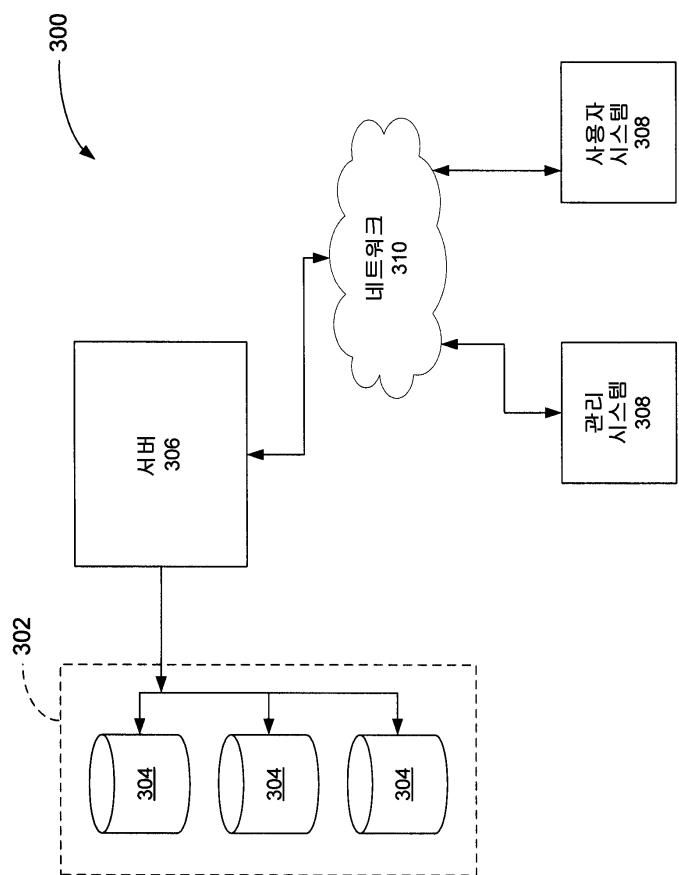
도면2c



도면2d



도면3



## 도면4

