



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2017-0102554  
(43) 공개일자 2017년09월11일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
G01N 27/02 (2006.01) G01N 33/42 (2006.01)  
(52) CPC특허분류  
G01N 27/02 (2013.01)  
G01N 33/42 (2013.01)  
(21) 출원번호 10-2017-7022726  
(22) 출원일자(국제) 2016년01월14일  
심사청구일자 없음  
(85) 번역문제출일자 2017년08월14일  
(86) 국제출원번호 PCT/US2016/013361  
(87) 국제공개번호 WO 2016/115318  
국제공개일자 2016년07월21일  
(30) 우선권주장  
62/103,835 2015년01월15일 미국(US)

(71) 출원인  
트랜스테크 시스템스, 인크.  
미국 뉴욕 12304 스킵터디 1594 스테이트 스트리트  
(72) 발명자  
코로시모, 도날드, 디.  
미국 뉴욕 12304 스킵터디 1594 스테이트 스트리트  
플루타, 사라, 이.  
미국 뉴욕 12302 스코티아 787 스웨거타운 로드  
휴이트, 존, 더블유.  
미국 뉴욕 12304 스킵터디 1594 스테이트 스트리트  
(74) 대리인  
김정훈

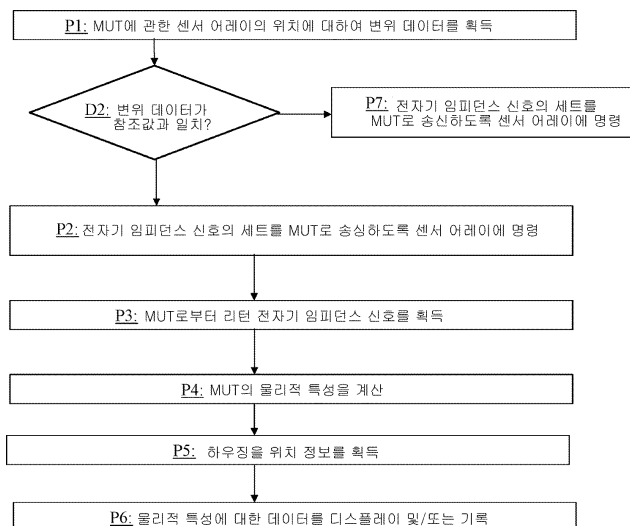
전체 청구항 수 : 총 36 항

(54) 발명의 명칭 차량으로부터 테스트 대상 재료의 물리적 특성의 측정 및 모니터링

(57) 요약

예를 들어 복소 전자기 임피던스를 사용하여 차량으로부터 테스트 대상 재료(Material Under Test; MUT)의 물리적 특성을 측정하고 모니터링하기 위한 시스템 및 방법이 개시된다. 다양한 실시예는: MUT에 관하여 센서 어레이의 위치에 대한 변위 데이터를 획득하는 단계; 상기 변위 데이터를 상기 센서 어레이가 상기 MUT에 관하여 참조 거리에 있는지 여부를 판정하기 위한 참조 변위 데이터와 비교하는 단계; 상기 센서 어레이가 상기 참조 거리에 위치한다는 판정에 응답하여, 상기 센서 어레이가 전자기 임피던스 신호들의 세트를 상기 MUT로 전송하도록 명령하는 단계; 상기 MUT로부터 리턴 전자기 임피던스 신호(return electromagnetic impedance signal)를 획득하는 단계 및 상기 전송된 전자기 임피던스 신호들의 세트, 상기 리턴 전자기 임피던스 신호 및 상기 변위 데이터에 기초하여 상기 MUT의 적어도 하나의 물리적 특성을 계산하는 단계를 포함하는 방법을 포함한다.

대표도



## 명세서

### 청구범위

#### 청구항 1

테스트 대상 재료(Material Under Test; MUT)에 관하여 센서 어레이의 위치에 대한 변위 데이터를 획득하는 단계;

상기 센서 어레이가 상기 MUT에 관하여 참조 거리에 있는지 여부를 판정하기 위해 상기 변위 데이터를 참조 변위 데이터와 비교하는 단계;

상기 센서 어레이가 상기 참조 거리에 위치된다는 판정에 응답하여, 상기 센서 어레이에 전자기 임피던스 신호들의 세트를 상기 MUT로 전송하도록 명령하는 단계;

상기 MUT로부터 리턴 전자기 임피던스 신호(return electromagnetic impedance signal)를 획득하는 단계; 및

상기 전송된 전자기 임피던스 신호들의 세트, 상기 리턴 전자기 임피던스 신호들 및 상기 변위 데이터에 기초하여 상기 MUT의 적어도 하나의 물리적 특성을 계산하는 단계

를 포함하는 방법.

#### 청구항 2

제1항에 있어서,

상기 센서 어레이에 대한 위치 정보를 획득하는 단계; 및

상기 MUT의 적어도 하나의 물리적 특성을 상기 위치 정보와 상관시키는(correlating) 단계

를 더 포함하는 방법.

#### 청구항 3

제2항에 있어서,

인터페이스에서 상기 MUT의 적어도 하나의 물리적 특성 및 상기 위치 정보에 대한 데이터를 디스플레이하거나 또는 기록하는 단계

를 더 포함하는 방법.

#### 청구항 4

제1항에 있어서,

상기 센서 어레이가 상기 참조 거리 외의 상기 MUT로부터 다른 거리(distinct distance)에 위치한다는 판정에 응답하여, 상기 센서 어레이의 위치가 상기 참조 거리와 일치하도록 상기 센서 어레이의 위치를 수정하는

방법.

#### 청구항 5

제4항에 있어서,

상기 센서 어레이의 위치를 수정한 후, 상기 MUT에 관하여 센서 어레이의 위치에 대한 변위 데이터를 획득하는 단계 및 상기 센서 어레이가 MUT에 관하여 참조 거리에 있는지 여부를 판정하기 위해 상기 변위 데이터를 참조 변위 데이터와 비교하는 단계를 반복하는 단계

를 더 포함하는 방법.

#### 청구항 6

제1항에 있어서,

상기 MUT의 적어도 하나의 물리적 특성은 상기 MUT의 밀도를 포함하는 방법.

#### 청구항 7

제6항에 있어서,

상기 MUT의 적어도 하나의 물리적 특성을 계산하는 단계는 상기 MUT와 상기 센서 어레이의 직렬-캐패시터 모델을 사용하는 단계를 포함하는 방법.

#### 청구항 8

제7항에 있어서,

상기 센서 어레이의 캐패시턴스(C)는 다음에 따라 모델링되고:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_{Air}} + \frac{1}{C_{MUT}},$$

여기서  $C_T$ 는 상기 센서 어레이의 캐패시턴스,  $C_{Air}$ 는 상기 센서 어레이와 상기 MUT 간의 캐패시턴스 및  $C_{MUT}$ 는 상기 MUT의 캐패시턴스인

방법.

#### 청구항 9

차량 탑재용 시스템에 있어서,

상기 차량과 연결하기 위한 적어도 하나의 마운팅 암(mounting arm);

상기 적어도 하나의 마운팅 암의 단부에 결합된 하우징;

-상기 하우징은,

테스트 대상 재료(Material Under Test; MUT)를 샘플링하기 위한 센서 어레이;

상기 MUT에 관하여 상기 하우징의 위치를 검출하기 위한 변위 센서

를 포함함-

상기 센서 어레이 및 상기 변위 센서에 결합된 적어도 하나의 컴퓨팅 장치; 및

적어도 하나의 마운팅 암에 결합되고 상기 적어도 하나의 컴퓨팅 장치와 통신하는 액추에이터 -상기 액추에이터는 상기 적어도 하나의 마운팅 암을 통해 상기 하우징의 위치를 수정함-

를 포함하고,

상기 적어도 하나의 컴퓨팅 장치는, 상기 하우징의 검출된 위치가 참조 거리로부터 벗어나는 경우 상기 하우징의 위치를 조정하도록 액추에이터를 작동시키기 위한 명령을 제공하도록 구성되는

시스템.

#### 청구항 10

제9항에 있어서,

상기 하우징은,

상기 적어도 하나의 컴퓨팅 장치와 결합된 위치 추적기를 더 포함하고, 상기 위치 추적기는 상기 하우징의 위치를 검출하고, 상기 적어도 하나의 컴퓨팅 장치는 일정 주기 동안 상기 하우징의 위치에 기초하여 상기 하우징의 이동 속도를 결정하도록 더 구성되는

시스템.

#### 청구항 11

제10항에 있어서,

상기 적어도 하나의 컴퓨팅 장치는,

상기 하우징의 위치를 상기 센서 어레이로부터의 상기 MUT의 샘플링과 상관시키도록 구성되는 시스템.

#### 청구항 12

제9항에 있어서,

상기 하우징은,

상기 적어도 하나의 컴퓨팅 장치와 결합된 온도 센서를 더 포함하고, 상기 온도 센서는 상기 MUT의 온도를 검출하는

시스템.

#### 청구항 13

제9항에 있어서,

상기 적어도 하나의 컴퓨팅 장치와 결합된 인터페이스를 더 포함하고, 상기 인터페이스는 상기 적어도 하나의 컴퓨팅 장치로부터 데이터를 디스플레이 하는

시스템.

#### 청구항 14

제9항에 있어서,

상기 변위 센서는 복수의 변위 센서들을 포함하는

시스템.

#### 청구항 15

제14항에 있어서,

상기 복수의 변위 센서들은 적어도 네 개의 다른 변위 센서들(distinct displacement sensors)을 포함하는

시스템.

#### 청구항 16

제9항에 있어서,

상기 변위 센서는 상기 MUT에 관하여 상기 하우징의 위치를 연속적으로 검출하도록 구성되고,

상기 적어도 하나의 컴퓨팅 장치는, 상기 하우징의 위치를 조정하도록 상기 액추에이터를 작동시키기 위한 명령들을 제공할지 여부를 판정하기 위해 상기 MUT에 관하여 하우징의 위치에 대한 데이터를 연속적으로 분석하도록 구성되는

시스템.

#### 청구항 17

테스트 대상 재료(Material Under Test; MUT)에 관하여 센서 어레이의 위치에 대한 변위 데이터를 획득하는 단계;

상기 센서 어레이에 전자기 임피던스 신호들의 세트를 상기 MUT로 전송하도록 명령하는 단계;

상기 MUT로부터 리턴 전자기 임피던스 신호(return electromagnetic impedance signal)를 획득하는 단계; 및  
상기 전송된 전자기 임피던스 신호들의 세트, 상기 리턴 전자기 임피던스 신호들 및 상기 변위 데이터에 기초하여 상기 MUT의 적어도 하나의 물리적 특성을 계산하는 단계  
를 포함하는 방법.

#### 청구항 18

제17항에 있어서,  
상기 센서 어레이에 대한 위치 정보를 획득하는 단계; 및  
상기 MUT의 적어도 하나의 물리적 특성을 상기 위치 정보와 상관시키는 단계  
를 더 포함하는 방법.

#### 청구항 19

제18항에 있어서,  
인터페이스에서 상기 MUT의 적어도 하나의 물리적 특성 및 상기 위치 정보에 대한 데이터를 디스플레이하거나  
또는 기록하는 단계  
를 더 포함하는 방법.

#### 청구항 20

제18항에 있어서,  
상기 MUT의 적어도 하나의 물리적 특성은 상기 MUT의 밀도를 포함하는  
방법.

#### 청구항 21

제17항에 있어서,  
상기 MUT의 적어도 하나의 물리적 특성의 계산은 상기 MUT와 상기 센서 어레이의 직렬-캐패시터 모델을 사용하는 것을 포함하고, 상기 센서 어레이의 캐패시턴스(C)는 다음에 따라 모델링되고:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_{Air}} + \frac{1}{C_{MUT}},$$

여기서  $C_T$ 는 상기 센서 어레이의 캐패시턴스,  $C_{Air}$ 는 상기 센서 어레이와 상기 MUT 간의 캐패시턴스 및  $C_{MUT}$ 는 상기 MUT의 캐패시턴스인  
방법.

#### 청구항 22

테스트 대상 재료(Material Under Test; MUT)에 관하여 비-접촉 센서 어레이의 위치에 대한 변위 데이터를 획득하는 단계;  
상기 센서 어레이에 전자기 임피던스 신호들의 세트를 상기 MUT로 전송하도록 명령하는 단계;  
상기 MUT로부터 리턴 전자기 임피던스 신호(return electromagnetic impedance signal)를 획득하는 단계; 및  
상기 전송된 전자기 임피던스 신호들의 세트, 상기 리턴 전자기 임피던스 신호들 및 상기 변위 데이터에 기초하여 상기 MUT의 적어도 하나의 물리적 특성을 계산하는 단계  
를 포함하는 방법.

#### 청구항 23

제22항에 있어서,

상기 센서 어레이에 대한 위치 정보를 획득하는 단계; 및

상기 MUT의 적어도 하나의 물리적 특성을 상기 위치 정보와 상관시키는 단계

를 더 포함하는 방법.

#### 청구항 24

제22항에 있어서,

상기 센서 어레이가 상기 참조 거리 외의 상기 MUT로부터 다른 거리(distinct distance)에 위치한다는 판정에 응답하여, 상기 센서 어레이의 위치가 상기 참조 거리와 일치하도록 상기 센서 어레이의 위치를 수정하는

방법.

#### 청구항 25

제22항에 있어서,

상기 MUT의 적어도 하나의 물리적 특성은 상기 MUT의 밀도를 포함하는

방법.

#### 청구항 26

제22항에 있어서,

상기 MUT의 적어도 하나의 물리적 특성의 계산은 상기 MUT와 상기 센서 어레이의 직렬-캐패시터 모델을 사용하는 것을 포함하는

방법.

#### 청구항 27

제26항에 있어서,

상기 센서 어레이의 캐패시턴스(C)는 다음에 따라 모델링되고:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_{Air}} + \frac{1}{C_{MUT}},$$

여기서  $C_T$ 는 상기 센서 어레이의 캐패시턴스,  $C_{Air}$ 는 상기 센서 어레이와 상기 MUT 간의 캐패시턴스 및  $C_{MUT}$ 는 상기 MUT의 캐패시턴스인

방법.

#### 청구항 28

차량 탑재용 시스템에 있어서,

테스트 대상 재료(Material Under Test; MUT)에 관한 참조 거리에서 센서 어레이를 상기 차량과 연결하기 위한 마운트;

표면 및 상기 표면 아래의 서브표면과 통신하기 위한 전극들의 어레이;

상기 전극들의 어레이와 동작 가능하게 연결된 신호 발생기; 및

상기 신호 발생기 및 상기 전극들의 어레이와 동작 가능하게 연결된 적어도 하나의 컴퓨팅 장치

를 포함하고,

상기 적어도 하나의 컴퓨팅 장치는:

상기 신호 발생기에 선택된 주파수에서 상기 전극들의 어레이로부터 상기 표면 및 상기 서브표면으로 전자기 신

호들을 전송하도록 명령하고,

상기 전자기 신호들의 전송 후, 상기 전극들의 어레이로부터 리턴 신호를 획득하고,

상기 표면 또는 상기 서브표면 중 적어도 하나의 물리적 특성을 결정하기 위해 상기 신호들을 조합하도록 구성되는

시스템.

#### 청구항 29

제28항에 있어서,

상기 MUT에 관한 참조 거리에서 상기 센서 어레이를 상기 차량과 연결하기 위한 상기 마운트는,

적어도 하나의 마운팅 암의 단부에 결합된 하우징을 갖는 적어도 하나의 조정 가능한 마운팅 암;

-상기 하우징은,

MUT(Material Under Test)를 샘플링하기 위한 센서 어레이;

상기 MUT에 관하여 상기 하우징의 위치를 검출하기 위한 변위 센서

를 포함함-

상기 센서 어레이 및 상기 변위 센서에 결합된 적어도 하나의 컴퓨팅 장치; 및

적어도 하나의 마운팅 암에 결합되고 상기 적어도 하나의 컴퓨팅 장치와 통신하는 액추에이터 -상기 액추에이터는 상기 적어도 하나의 마운팅 암을 통해 상기 하우징의 위치를 수정함-

를 포함하고,

상기 적어도 하나의 컴퓨팅 장치는, 상기 하우징의 검출된 위치가 참조 거리로부터 벗어나는 경우 상기 하우징의 위치를 조정하도록 액추에이터를 작동시키기 위한 명령을 제공하도록 구성되는

시스템.

#### 청구항 30

제29항에 있어서,

상기 하우징은,

상기 적어도 하나의 컴퓨팅 장치와 결합된 위치 추적기를 더 포함하고, 상기 위치 추적기는 상기 하우징의 위치를 검출하는

시스템.

#### 청구항 31

제30항에 있어서,

상기 적어도 하나의 컴퓨팅 장치는,

상기 하우징의 위치를 상기 센서 어레이로부터의 상기 MUT의 샘플링과 상관시키도록 구성되는

시스템.

#### 청구항 32

제29항에 있어서,

상기 하우징은,

상기 적어도 하나의 컴퓨팅 장치와 결합된 온도 센서를 더 포함하고, 상기 온도 센서는 상기 MUT의 온도를 검출하는

시스템.

### 청구항 33

제29항에 있어서,

상기 적어도 하나의 컴퓨팅 장치와 결합된 인터페이스를 더 포함하고, 상기 인터페이스는 상기 적어도 하나의 컴퓨팅 장치로부터 데이터를 디스플레이 하는

시스템.

### 청구항 34

제29항에 있어서,

상기 변위 센서는 복수의 변위 센서들을 포함하는

시스템.

### 청구항 35

제34항에 있어서,

상기 복수의 변위 센서들은 적어도 네 개의 다른 변위 센서들(distinct displacement sensors)을 포함하는

시스템.

### 청구항 36

제29항에 있어서,

상기 변위 센서는 상기 MUT에 관하여 상기 하우징의 위치를 연속적으로 검출하도록 구성되고,

상기 적어도 하나의 컴퓨팅 장치는, 상기 하우징의 위치를 조정하도록 상기 액추에이터를 작동시키기 위한 명령들을 제공할지 여부를 판정하기 위해 상기 MUT에 관하여 하우징의 위치에 대한 데이터를 연속적으로 분석하도록 구성되는

시스템.

## 발명의 설명

## 기술 분야

[0001]

본 발명은 복소 전자기 임피던스(complex electromagnetic impedance)를 사용하는 차량으로부터 물리적 특성을 연속적으로 모니터링하는 시스템 및 방법에 관한 것이다. 복소 임피던스는 차량에 탑재되고 테스트 대상 재료(Material Under Test; MUT)의 표면 이상의 측정된 높이에 위치한 센서 어레이를 사용하여 측정된다. 센서 어레이는 센서 어레이와 MUT의 표면 사이의 기준 거리를 유지하도록 제어 가능한 구조를 통해 차량에 탑재된다. 복소 임피던스 측정 및 센서 어레이와 MUT의 표면 사이의 측정된 거리는 MUT의 물리적 특성을 계산하기 위해 사용된다.

## 배경 기술

[0002]

아스팔트 혼합물(Hot Mix Asphalt; HMA)은 도로 포장에 사용되는 고도로 엔지니어링된 제품이다. 본원에 논의된 목적을 위해, HMA는 세가지 성분으로 구성된다: 1) 역청 혼합물(bitumen mixture), 2) 석조 골재(stone aggregate) 3) 공기. HMA는 특정 석조 골재가 최대 섭씨 175도(화씨 약 350도)의 온도에서 특정 역청과 혼합되는 공장에서 생산된다. 역청은 골재를 코팅한다. 이후, 혼합물은 혼합물이 포장 기계(또한, 페이퍼(paver) 또는 스크리드(screed)라고 함)로 분사되는 포장 현장으로 보내진다. HMA가 페이퍼에 의해 우선 놓여지면, 그 것의 온도는 섭씨 약 135도(화씨 약 275도)일 수 있고, 약 15%의 공극(air void)을 포함할 수 있다. HMA가 설계 기준을 만족시키기 위해, 공극 함량(air void content)은 일반적으로 약 5%로 감소되어야 한다. 이러한 감소는 그것이 압축될 수 있는 온도 영역에 있는 동안 HMA를 압연(rolling)함으로써 달성된다. 몇몇 경우에서, HMA는 하나 이상의 롤러 유형을 사용하여 압축될 수 있다. 제1 유형의 롤러는 브레이크-다운 롤러 또는 진동 롤러이다. 도



1은 종래 기술에 따른 고급 스틸 드럼 진동 롤러(highway grade steel drum vibratory roller)를 도시한다. 몇몇 경우에서, 이러한 진동 롤러는 도로 과정에서 사용되는 제1 롤러이고, HMA의 대부분의 압축을 제공한다. 진동 롤러는 통상적으로 회전하는 하중(rotating weights)을 갖는 하나 또는 두 개의 스틸 드럼을 갖고, 이것은 드럼을 회전시키고, 동력을 생성하여, 롤러의 사하중을 가중시키고, 압력을 증가시킨다(예를 들어, HMA 에서). HMA의 압력에 통상적으로 사용되는 제2 유형의 롤러는 고무-타이어 롤러(rubber-tired roller) 또는 공압 롤러(pneumatic roller)이고, 이것은 분산된 압축 영역을 제공하기 위해 엇갈린(staggered) 복수의 고무 타이어들을 포함한다. 고무-타이어 롤러는 HMA의 표면을 반죽하고 아스팔트의 상부 표면에 형성된 기공을 막도록 설계된다. HMA의 압축에 사용되는 제3 유형의 롤러는 마감(또는, 피니싱(finishing)) 롤러이고, 이것은 이전 롤러들 중 하나에 의해 형성된 주름을 최소화하거나 또는 제거하기 위해 마지막에 사용되어 매끄러운 표면을 남긴다.

[0003] 포장의 품질은 통상적으로 완성된 제품의 밀도뿐만 아니라, 마감의 매끄러움에 의해 측정된다. 압축되지 않은(under-compacted) 아스팔트 매트 는 공기와 물이 침투할 수 있어, 포장도로(pavement) 수명을 단축시킨다. 또한, 압축되지 않은 아스팔트에서, 바람직하지 않는 공극의 존재는, 내부-입자 접촉 점의 수를 감소시키고, 동결-융해 조건에 더 취약하기 때문에 아스팔트 포장도로를 덜 안정하게 만들 수 있다. 한편, 불필요한 과도한-압축은 골재 아스팔트를 부수어, 공극 함량의 감소를 야기할 수 있고, 이것은 차례로 영구 변형에 민감한 포장도로를 만들 수 있다. 포장도로가 압축되지 않거나 과도하게 압축되는 경우, 포장 업자는 처벌 받을 수 있다. 따라서, 원하는 압축의 레벨/범위를 달성하는 것이 좋다. 밀도의 측정은 밀도의 점 측정을 제공하는 해당 ASTM 국제 표준에 따라 다양한 휴대용 기기에 의해 압연 프로세스 중 또는 후에 수행될 수 있다. 통상적으로, 포장이 완료된 후에, 직경 약 15.25-cm(6 in)의 코어 또는 플러그가 포장도로로부터 절단되고, 그것의 밀도는 다양한 ASTM 국제 표준에 따라 측정된다.

[0004] 압연 중 및 압연 후 스왑 모니터링의 이러한 접근은 다양한 문제들을 나타낸다. 한 가지 이슈는 도로의 매우 작은 영역이 검사되어야 한다는 것이다. 일반적인 커미셔닝 기관(예를 들어, 운송 부서 등)의 요구사항은 포장된 도로 레인의 1,000 피트마다 한 번의 측정을 수행하는 것이다. 이러한 매우 제한된 샘플은 전체 포장 프로젝트의 대표적인 샘플이 아닐 수 있다. 롤러 장치로부터 아스팔트 밀도를 연속적으로 측정하는 이슈를 해결하도록 시도하는 종래의 접근법 중 하나가 미국 특허 제5,952,561호(그것의 전체가 본원에 참조로서 인용 됨)에서 설명된다. 이러한 접근법은 1997년에 미국 교통부(US Department of Transportation; US DOT) 연구위원회의 혁신적 탐험 분석(Innovations Deserving Exploratory Analysis; IDEA) 프로그램에 의해 지원되었다. 미국 특허 제5,952,561호에 설명된 접근법은, 아스팔트 밀도를 검출하기 위해 롤러 장치의 앞과 뒤에 탑재된 마이크로 웨이브 센서를 사용하는 것에 기초한다(선행 기술, 도 2 참조). 미국 특허 제5,952,561호에서 아스팔트의 밀도를 검출하기 위해 권장되는 실제 파장은 1 내지 3.75-cm(30 내지 8GHz) 범위이다. 하지만, 이러한 접근법은 몇 가지 단점이 있다. 예를 들어, 500MHz 내지 30GHz에서 동작하는 마이크로파 센서가 아스팔트의 정확한 밀도 측정을 제공할 수 있다는 것은 아직 밝혀지지 않았다. 또한, 미국 특허 제5,952,561호에서 설명된 측정 접근법은, 각 판독 값에 대한 오차 대역이 실제 판독 값을 초과 할 수 있는 두 개의 판독 값 간의 차이에 기초한다. 그러므로, 이러한 종래의 접근법은 비현실적인 것으로 판명되었다.

[0005] 이후의 종래 접근법은 롤러에 의해 제공된 입력 진동 부하와 롤러 아래의 재료의 측정된 응답 간의 변화의 연속 측정에 기초한다. 이러한 기술은 포장도로의 탄성 계수 또는 강성을 측정하는 것으로 불린다. 이러한 측정이 페-루프 방식으로 롤러에 의해 전달되는 압축 영향(compactive effort)을 변경하는 데 사용될 경우, 그리고 위성 위치 확인(Global Positioning Satellites; GPS) 및 지리 정보 시스템(Geographic Information System; GIS) 맵핑 프로그램이 조합될 경우, 이러한 접근법에 대한 현재 명칭(nomenclature)은 "지능형 압축(intelligent Compaction)"이라고 불린다.

[0006] 이러한 지능형 압축 접근법은 미국 특허 제4,870,601호, 제5,727,900호, 제6,122,601호, 제6,551,019호, 제7,669,458호 및 제8,190,338호(각각은 그것의 전체가 본원에 참조로서 인용 됨)에 제시된다. 이후 종래의 개념은 도 3의 선행 기술의 설명으로 도시된다. 이러한 접근법에서, 진동 임펄스는 롤러의 드럼(또는 드럼들)에 의해 아스팔트, 아스팔트 아래의 서브-베이스(sub-base) 및 서브-베이스 아래의 서브그라이드(subgrade)로 전달된다. 이러한 종래의 접근법은 전체 시스템이 스프링 및 댐퍼의 조합으로 표현되는, 다양한 재료 레이어에 부과되는 힘에 의해 모델링될 수 있다고 가정한다. 도 3의 설명에서, 세 개의 레이어가 존재한다: 아스팔트; 서브-베이스; 및 서브-그라이드. 아스팔트(또는 포장도로) 레이어는 전형적으로 25 내지 30cm(10 내지 12인치) 두께이고, 서브베이스는 유사한 두께를 가질 수 있다. 서브-베이스는 일반적으로 공학 지정 등급(engineering specified grade)의 분쇄 암(crushed rock)이다. 서브-그라이드는 일반적으로 도로의 기반을 제공하기 위해 그라이드되고(graded) 압축된 지역 토양이다. 아스팔트의 단일 레이어가 있는 도 3의 단순화된 도면과 달리, 실제

로, 아스팔트의 복수의 레이어들이 있다. 아스팔트 내에는, 일반적으로 약 13cm(5.25-인치)의 압축된 두께를 갖는 베이스 레이어, 9cm(3.5-인치)의 압축된 두께를 갖는 중간 레이어 및 4.5cm(1.75-인치)의 압축된 두께를 갖는 상부 또는 마감 레이어가 존재한다. 도 3의 설명은, 단지 기본 레이어의 포장을 설명하기 위한 것이다. 아스팔트 레이어의 수가 증가하고 더 얇아질 수록, 모델링은 각각의 프레쉬 아스팔트 레이어의 반응을 통상적으로 약 1.0 내지 1.2 미터 깊이로 추정되는 진동 롤러의 영향 영역에 있는 모든 물질의 반응과 관련시키는 것이 더욱 어려워진다. 이것이 진동-기반 지능형 압축이 아스팔트 포장도로에 매우 성공하지 못한 이유 중 하나이다.

[0007] 아스팔트의 진동-기반 측정에 직면하는 몇몇 다른 문제점들은 아스팔트의 강성이 그것의 온도에 따라 변한다는 것이다. 차가운 아스팔트는, 실제 압축량에 관계없이 따뜻한 아스팔트보다 더 강경하다. 또한, 측정 값은, 폭이 약 220cm(87-인치)인 롤러 드럼에 기초한다. 이러한 롤러의 너비는 압축되지 않는 아스팔트 위에 롤러가 "브리지(bridge)"하게 할 수 있다.

[0008] 진동 지능형 압축에 직면하는 문제는 측정된 아스팔트 탄성 계수 또는 강성을 밀도로 변환하는 승인된 방법이 현재 없다는 것이다. 압축된 아스팔트의 실제 밀도는 엔지니어링 규격이 기준이 되는 파라미터이다.

[0009] 본원에 언급된 바와 같이, 종래의 접근법은 아스팔트가 롤링되는 동안 아스팔트의 밀도의 연속 정량적 측정(continuous quantitative determination)을 제공하지 못한다.

[0010] 아스팔트 및 다른 재료의 밀도의 정량적 판독 값을 제공하기 위한, 전자기 임피던스 측정 장치의 사용은 미국 특허 제5,900,736호, 제6,414,497호 및 제7,219,024호(각각은 그것의 전체가 본원에 참조로서 인용 됨)에서 확인되었다. 하지만, 이러한 특허에 개시된 접근법은 센서가 아스팔트와의 접촉을 유지하는 것을 요구한다. 이러한 제한을 극복하기 위해, 이후의 접근법(미국 특허 제7,226,239호 및 제7,575,395호에 설명된 바와 같이, 각각은 그것의 전체가 본원에 참조로서 인용 됨)은 당시 시판되는 게이지를 롤러에 탑재된 상태에서 아스팔트와 접촉하여 사용하도록 개발되었다. 하지만, 이러한 방법은 측정을 수행하기 위해 정상적인 롤러 동작의 중단을 필요로 하고, 그러므로 연속적이지 않다는 점에서 제한된다.

## 발명의 내용

### 과제의 해결 수단

[0011] 본 발명의 측면은 테스트 대상 재료(Material Under Test; MUT), 예를 들어 아스팔트, 토양 등의 물리적 특성(예를 들어, 밀도)에 관한 전자기 임피던스 특성을 연속적으로 획득하기 위한 방법, 장치 및 시스템을 포함한다.

[0012] 실시예는 다양한 실시예에 따라 구성된 하나 이상의 장치들을 사용하여 수행될 수 있는 방법들을 포함한다. 몇몇 실시예는 차량(롤러를 포함하는 차량)에 탑재된 지지 구조를 갖는 장치들을 포함하고, 여기서 지지 구조는 MUT의 밀도를 연속적으로 측정/모니터하도록 비-접촉 통신을 통해 MUT와 통신하기 위한 센서 어레이를 포함한다. 압연 동안 밀도의 연속 측정(예를 들어, 아스팔트와 같은 MUT의 압연)에 대한 다양한 실시예는 롤러에 탑재된 지지 구조 어셈블리 및 지지 구조체에 탑재된 센서 어레이 어셈블리를 포함한다. 이러한 실시예에서, 지지 구조 어셈블리는 가변 위치 시스템, 거리 측정 시스템 및 제어 시스템을 포함한다. 센서 어레이 어셈블리는: 전극들의 어레이와 동작 가능하게 연결된 신호 발생기 - 선택된 주파수들의 범위에서 전극 어레이(array of electrodes)(MUT를 향해) 진동하는 전자기장 신호들을 송신하기 위한 신호 발생기-; 전극들의 어레이에 동작 가능하게 연결된 신호 검출기, 신호 발생기 및 신호 검출기에 동작 가능하게 연결된 신호 비교기; 및 신호 비교기에 동작 가능하게 연결된 적어도 하나의 컴퓨팅 장치를 포함할 수 있다. 적어도 하나의 컴퓨팅 장치는 측정 중인 MUT의 물리적 특성(예를 들어, 밀도)에 관련된 전자기 임피던스 특성을 결정하도록 구성된다. 적어도 하나의 컴퓨팅 장치는, MUT의 밀도 계산에 팩터로서 사용될 수 있는, MUT에 관한 센서 어레이의 위치에 대한, 데이터를 예를 들어 거리 측정 시스템 또는 지지 구조와 연관된 다른 시스템들로부터 획득할 수 있다. 적어도 하나의 컴퓨팅 장치는 또한 사용자가 센서 어레이의 다양한 측면을 제어하고, 데이터를 다양한 포맷으로 디스플레이하고, 데이터 파일을 저장하고, 데이터 파일을 다양한 수단으로 다른 컴퓨터에 송신하도록 허용하는 사용자 인터페이스 및 데이터 저장부를 포함한다. 이러한 시스템으로부터의 데이터는 종래의 접근법에 따라 지리 정보 시스템(Geographic Information System; GIS) 데이터베이스 및 디스플레이에 포함될 수 있다.

[0013] 다른 실시예는 롤러 이외의 차량에 탑재하기 위한 시스템을 포함할 수 있다. 이러한 대안적인 시스템의 지지 구조는 MUT에 관한 고정된 또는 가변적인 위치를 가질 수 있다. 하지만, 본원에 설명된 다양한 실시예와 같이, 지지 구조 어셈블리는 거리 측정 시스템을 포함한다.

[0014] 본 개시에 제공된 전극 센서 어레이의 방법 및 다양한 실시예는, 다른 것들 중에서도, 이후에 MUT의 물리적 특성에 상관될 수 있는 MUT의 연속 전자기 임피던스 분광 특성(들)(continuous electromagnetic impedance spectrographic characteristic(s))을 확보함으로써 종래의 접근법보다 개선된 점을 제공한다.

### 도면의 간단한 설명

[0015] 도 1은 아스팔트 도로를 포장하기 위해 사용되는 종래 기술의 듀얼 스틸 드럼 롤러의 이미지이다.

도 2는 종래 기술의 밀도 측정 시스템의 도면이다.

도 3은 종래 기술에 따른 아스팔트의 탄성 계수 또는 강성을 결정하기 위한 진동 압축의 이론을 설명하는 개략도이다.

도 4는 가변 기능을 갖는 다섯 개의 전극 선형 어레이의 개략도이고, MUT의 측정된 볼륨(volumes)을 보여준다.

도 5는 MUT의 상이한 볼륨을 측정하기 위한 네 개의 전극 어레이의 사용의 개략도이다.

도 6은 도 5의 상이하게 측정된 볼륨의 개략도이다.

도 7은 도 5 및 도 6에서 계산된 볼륨에 대한 측정된 볼륨의 관계의 개략도이다.

도 8은 도 5 내지 도 7에서 계산된 볼륨에 대한 명칭 및 관계의 개략도이다.

도 9는 도 5 내지 도 8에 대해 관련 수학식으로 계산되고 측정된 볼륨의 제1 레벨의 개략도이다.

도 10은 다양한 실시예에 따라 측정된 복셀 C에 대해 사용된 등가 회로의 개략도이다.

도 11은 다양한 실시예에 따른 복셀 A에 대한 관련 수학식으로 계산되고 측정된 볼륨의 제2 레벨의 개략도이다.

도 12는 다양한 실시예에 따른 복셀 B에 대한 관련 수학식으로 계산되고 측정된 볼륨의 제3 레벨의 개략도이다.

도 13은 다양한 실시예에 따른 복셀 C에 대한 관련 수학식으로 계산되고 측정되는 볼륨의 제3 레벨의 개략도이다.

도 14는 다양한 실시예에 따라 이동하는 선형 어레이(moving linear array)의 개략도이다.

도 15는 다양한 실시예에 따른 선형 어레이의 이동으로부터 유도되는 3차원 복셀의 개략도이다.

도 16은 다양한 실시예에 따른 송신 전극이 시간 주기  $\delta$  마다 변하는 이동하는 선형 어레이의 개략도이다.

도 17은 다양한 실시예에 따른 각 선형 전극이 상이한 주파수에서 동작하는 사각 평면 전극 어레이의 개략도이다.

도 18은 다양한 실시예에 따른 엇갈린 선형 전극들로 구성된 평면 어레이의 개략도이다.

도 19는 다양한 실시예에 따라 서브-복셀의 특성이 서브-복셀의 특성 어레이를 사용하여 결정될 수 있는 방법을 더 나타내는, 도 18의 평면 어레이의 도식 설명이다.

도 20은 다양한 실시예에 따른 대형 검사 매트릭스 상에 개별 평면 센서 어레이 배치의 개략도이다.

도 21은 다양한 실시예에 따른 예시적인 전극 형태의 도식 설명이다.

도 22는 다양한 실시예에 따른 과정을 나타내는 흐름도이다.

도 23은 다양한 실시예에 따른 과정을 나타내는 흐름도이다.

도 24는 다양한 실시예에 따른 과정을 나타내는 흐름도이다.

도 25는 본 개시의 다양한 실시예에 따른 시스템의 2-차원 개략도이다.

도 26은 본 개시의 다양한 실시예에 따른 샘플 센서 시스템의 개략도이다.

도 27은 다양한 실시예에 따른 과정을 나타내는 흐름도이다.

도 28은 다양한 실시예에 따른 과정을 나타내는 흐름도이다.

도 29는 본 개시의 다양한 실시예에 따른 센서 어레이 어셈블리의 개략도이다.

도 30은 본 개시의 다양한 실시예에 따른 시스템의 개략도이다.

도 31은 본 개시의 다양한 실시예에 따른 시스템의 개략도이다.

도 32는 본 개시의 실시예에 따른 다양한 전극 어레이에서 센서 형태의 개략적인 설명을 도시한다.

도 33a는 본 개시의 다양한 실시예에 따른 예시적인 센서 어레이 어셈블리의 하부 투시도의 이미지이다.

도 33b는 도 33a의 예시적인 센서 어레이의 측면 투시도의 이미지이다.

도 34a는 본 개시의 다양한 실시예에 따른 차량에 탑재된 시스템을 설명하는 측면 이미지 개요이다.

도 34b는 도 34a의 시스템의 확대도이다.

도 35는 본 개시의 다양한 추가적인 실시예에 따른 시스템을 설명하는 이미지이다.

도 36은 본 개시의 다양한 실시예에 따른 시스템의 개략적인 설명이다.

도 37은 본 개시의 다양한 실시예에 따른 핸드 카트에 탑재된 시스템의 이미지이다.

도 38은 본 개시의 다양한 실시예에 따른 모니터링 시스템을 포함하는 자율 주행 시험 차량(autonomous highway inspection vehicle)의 이미지이다.

도 39는 본 개시의 다양한 실시예에 따른 시스템을 포함하는 환경을 도시한다.

### 발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0016] 다음 논의는 테스트 대상 재료(Material Under Test; MUT)의 물리적 특성의 연속 정량 측정을 제공하기 위해 종래 기술에 개시된 방법론을 확장하고 개선한다. 본원의 다양한 실시예에서, 논의된 물리적 특성은 밀도이고, MUT는 아스팔트이다. 하지만, 다양한 실시예는 별개의 물리적 특성 및 별개의 MUT에 적용될 수 있는 접근법을 포함하는 것으로 이해된다. 고려된 응용에는 프로세스 중 품질 관리(포장 프로세스 동안의 아스팔트 등)가 포함된다. 몇몇 경우에서, 시스템 및 방법을 포함하는 접근법이 압연 프로세스 중에 적용될 수 있고, 다른 경우에는 압연 후에 수행될 수도 있다. 어쨌든, 본원에 기술된 접근법은 재료(예를 들어, 도로의 아스팔트)의 향상된 품질 검사를 제공할 수 있다.
- [0017] 본원에 언급된 바와 같이, MUT(예를 들어, 아스팔트)의 물리적 특성(예를 들어, 밀도)의 연속 판독값(continuous readings)을 획득하기 위해, 본 발명자는 이러한 판독값을 얻기 위한 센서가 MUT(예를 들어, 아스팔트)와 접촉하지 않는 동안 동작 가능해야 한다는 것을 발견했다. 다양한 실시예에서, 본 발명자는 미국 특허 공보 제2013/0307564호 및 미국 특허 출원 제61/703,488호, 제61/906,664호 및 제61/932,400호(각각은 그것의 전체가 본원에 참조로서 인용 됨)에 개시되고 도시된 것과 유사한 하나 이상의 선형 전자기 센서 어레이를 활용했다.
- [0018] 본원에 설명된 바와 같이, 다양한 실시예는 MUT(예를 들어, 아스팔트)의 측정된 볼륨에 대한 전자기 임피던스 데이터를 연속적으로 획득하고, 그 전자기 임피던스 데이터에 기초하여 MUT(예를 들어, 밀도)의 물리적 특성을 결정하기 위한 접근법을 포함한다. 압연된 MUT, 예를 들어 아스팔트의 경우, 압연 프로세스 중 품질 관리 측정으로서, 압연 프로세스 후 품질 보증 검사로서, 또는 복원을 위한 요구 사항을 결정하기 위한 기존 도로의 특징으로서 지속적인 측정/모니터링이 이루어질 수 있다.
- [0019] 본원에 사용된 바와 같이, MUT는 아스팔트 혼합물(hot mix asphalt) 이외에, 본원에 도시된 또는/추가로 기재된 하나 이상의 접근법(예를 들어, 전자기 분광법)을 통해 특징화될 수 있는 임의의 물질을 포함 할 수 있다. 다양한 실시예에서, MUT는, MUT 위의 센서 높이를 제어 또는 고정하기 위한 수단을 갖는 임의의 유형의 차량에 탑재된 비-접촉 전자기 센서에 의해 모니터링될 수 있는 임의의 물질을 포함한다.
- [0020] 본원에 설명된 다양한 실시예는 포장 프로세스 중에 MUT(예를 들어, 아스팔트)의 밀도를 측정하기 위해, 예를 들어 포장 롤러에 탑재된 비-접촉 전자기 어레이의 적용에 초점을 맞춘다. 전자기 센서가 탑재된 차량은 MUT와 관련하여(위의(above)) 센서의 높이를 제어 및/또는 고정하는 수단을 제공하는 임의의 유형의 동력(motorized) 또는 비-동력(non-motorized) 차량일 수 있다. 차량(들)은 아스팔트 포장에 사용되는 차량(예를 들어, 롤러 및 포장 기계(pavers)), 동력 차량(motorized vehicle)(예를 들어, 일반 고속도로-횡단 차량(conventional motorway-traversing vehicles) 및 비- 고속도로 횡단 차량(non-motorway-traversing vehicles)) 및 비-동력



차량(예를 들어, 핸드 카트)을 포함할 수 있다. 본원에 언급된 바와 같이, MUT는 차량에 장착된 비-접촉 전자기 센서에 의해 측정될 수 있는 임의의 물질, 예를 들어 하나 이상의 아스팔트 레이어, 하나 이상의 서브-베이스 레이어 및/또는 하나 이상의 서브-그라이드 레이어일 수 있다. 물리적 특성 또는 측정된 특성들은, 밀도 및 수 분 함량을 포함하지만 이에 제한되지 않는, 전자기 분광법의 적용에 의해 결정될 수 있는 MUT의 임의의 물리적 특성을 포함할 수 있다. 본원의 다양한 실시예에 따라 설명된 교시는, 본원에 설명된 바와 같은 MUT의 물리적 특성뿐만 아니라 다양한 실시예의 다른 접근법을 측정하도록 차량에 탑재된 비-접촉 전자기 센서의 임의의 조합에 적용될 수 있다는 것이 이해된다.

[0021] 이러한 개시에서, 전자기 센서 어레이는 송신 전극 및 수신 전극을 포함할 수 있다. 센서 어레이는 MUT로 다양한 깊이를 샘플링하고 또는/추가로 MUT의 원하는 측정치를 확보하는데 적절한 감도를 획득하도록 구성된 임의의 수의 전극들을 포함할 수 있다.

[0022] 이하 설명에서, 그 일부를 형성하는 첨부 도면을 참조하고, 이것에 본 교시가 실시될 수 있는 특정 예시적인 실시예가 예시적으로 도시된다. 이러한 실시예는 당업자가 본 교시를 실시할 수 있도록 충분히 상세하게 설명되고, 다른 실시예가 활용될 수 있고, 본 교시의 범위를 벗어나지 않고 변경이 이루어질 수 있음을 이해해야 한다. 그러므로, 다음 설명은 단지 예시적인 것이다.

[0023] 하나 이상의 구현, 변경 및/또는 수정에 관한 예시가 첨부된 청구 범위의 사상 및 범위를 벗어나지 않고 도시된 예에 대해 행해질 수 있다. 또한, 특정 특징이 몇몇 구현들 중 단지 하나에 관하여 개시되었을 수 있지만, 이러한 특징은 임의의 주어진 또는 특정 기능에 대해 바람직하고 유리할 수 있는 바와 같이 다른 구현들 중 하나 이상의 다른 특징들과 결합될 수 있다. 또한, 용어들 "포함하는(including)", "포함한다(includes)", "갖는(having)", "갖는다(has)", "함께(with)" 또는 그 변형은 상세한 설명 및 청구 범위에서 사용되는 범위 내에서 사용되고, 이러한 용어는 "포함하는(comprising)"과 유사한 방식으로 포괄적인 것으로 의도된다. "적어도 하나 의"라는 용어는 나열된 항목 중 하나 이상을 선택할 수 있음을 의미하는 것으로 사용된다.

[0024] 넓은 범위의 실시예를 설명하는 수치 범위 및 파라미터가 근사치임에도 불구하고, 특정 실시예에 기재된 수치값은 가능한 한 정확하게 보고된다. 하지만, 임의의 수치는 본질적으로 각각의 시험 측정에서 발견된 표준 편차로부터 필연적으로 발생하는 특정 오류를 포함한다. 또한, 본원에 개시된 모든 범위는 그 안에 포함되는 임의의 및 모든 하위-범위를 포함하는 것으로 이해되어야 한다. 예를 들어, "10 미만"의 범위에는 0의 최소값과 10의 최대값 사이의(및, 포함하는) 임의의 및 모든 하위-범위(및, 포함하는), 다시 말해, 0 이상의 최소값 및 10 이하의 최대 값, 예를 들어 1 내지 5를 갖는 임의의 및 모든 하위 범위를 포함 할 수 있다. 특정 경우에, 파라미터에 대해 설명된 수치 값은 음수 값을 가질 수 있다. 이러한 경우, "10 미만"으로 설명된 범위의 예시적인 값은 음의 값, 예를 들어, -1, -2, -3, -10, -20, -30 등을 가질 수 있다.

[0025] 미국 특허 제5,900,736호; 6,400,161; 6,414,497; 및 6,677,763(각각은 그것의 전체가 본원에 참조로서 인용 됨)은 아스팔트의 전자기 임피던스 특성을 사용하여 아스팔트의 밀도를 평가하는 수단으로서 동심원의 2-전극 센서 어레이를 제시한다. 이러한 접근법은 분광법 또는 단층 촬영법을 사용하지 않지만, 전자기 임피던스 측정 장치와 함께 사용하기 위한 2-전극 구조를 나타낸다. 미국 특허 제 7,219,021호(그것의 전체가 본원에 참조로서 인용 됨)는 미국 특허 제5,900,736호 및 제6,414,497호에 도시된 장치에서와 유사한 전극 구조로 토양의 밀도 및 수분을 평가하기 위한 전자기 임피던스 분광법의 사용을 제시한다. 이러한 전극 어레이는 MUT와 비-전도성(전기적 또는 물리적으로 접촉하지 않음)으로 통신한다. 미국 특허 공보 제2013/0307564호 및 미국 임시 특허 출원 제61/703,488호(각각은 그것의 전체가 본원에 참조로서 인용 됨)는, MUT와 전도성 또는 비-전도성으로 통신하는 선형 전극 어레이를 갖는 임피던스 분광법 및 임피던스 단층 촬영법으로 MUT를 평가하는 두 가지 상이한 방법을 제시한다. 미국 임시 특허 출원 제61/906,664호(그것의 전체가 본원에 참조로서 인용 됨)는 MUT의 표면으로부터 전자기 단층 촬영 및 분광 임피던스 측정을 획득하기 위한 대안적인 구성과, 이러한 측정치를 물리적 파라미터로 변환하는 프로세스를 제시한다. 하지만, 이러한 접근법은, 프로세스 제어, 영역 검사 또는 MUT의 특성 조사를 제공하기 위해 차량에 탑재된 어레이의 적용을 다루지 않는다.

[0026] 다양한 실시예는 MUT 위의 센서 어레이의 높이를 제어하는 지지/제어 시스템과 함께 방법 및 전자기 센서 어레이를 포함한다. 다양한 실시 예에서, 전자기 센서 어레이는 큰 영역에 걸쳐 MUT의 선택된 특성의 프로세스 및/또는 후속 검사 또는 조사를 제공하기 위해 차량에 탑재된다. 본원에 언급된 바와 같이, 이러한 측정은 하나 이상의 종래의 위성 항법(Global Positioning Satellites; GPS) 시스템 및/또는 하나 이상의 지리 정보 시스템(Geographic Information System; GIS)으로부터의 데이터와 결합될 수 있다. 본 발명은, MUT의 선택된 볼륨의 밀도와 같은 물리적 특성을 결정하기 위해 사용되는, MUT의 선택된 볼륨의 전자기 임피던스 분광 특성을 획득

(예를 들어, 연속적인)하기 위한 방법, 시스템 및 컴퓨터 프로그램을 개시한다.

- [0027] 미국 임시 특허 출원 제61/703,488호에 설명된 바와 같이, 임피던스 측정 시스템의 개략도가 도 4에 도시된다. 이러한 개략도는 다섯 개의 전극들(102)을 갖는 임피던스 센서 시스템 (100)을 도시하고, 그 중 하나 인, 102A는 신호 발생기(104), 예를 들어 DDS(Direct Digital Synthesizer)에 의해 공급되는 주파수의 범위에 걸쳐 신호의 입력을 제공한다. 이러한 예시에서, 다른 4개의 전극들은 MUT(250)를 통과하는 신호를 갖는 회로를 완성할 수 있다. 신호 발생기(104)(DDS)로부터의 원 신호(original signal)는 MUT(250)를 통과하는 신호와 비교될 수 있다. 비교기(106)의 출력은 원 신호로부터 리턴 신호로의 크기 및 위상 천이의 차이이다. 송신 및 리턴 신호의 크기 및 위상 데이터는, 데이터를 처리하고 그것을 통계적 프로세스 제어(예를 들어, 마이크로 프로세서(108)에 내장된 컴포넌트)로 송신하는 마이크로 프로세서(108)에 전달될 수 있다. 마이크로 프로세서(108)는 또한 생성될 주파수를 선택하기 위해 DDS(104)를 제어 할 수 있다. 도시된 실시 예에서, 송신 전극 및 수신 전극들의 순서는 고정된다.
- [0028] 도 4에 도시된 이러한 예시에서, 전극들(102)은 MUT(250)와 통신하도록 구성되지만, MUT(250)와 전기적으로 접촉하지 않고, 다시 말해 MUT(250)로부터 전기적으로 절연된다(예를 들어, 절연 물질 또는 공기 갭에 의해). 몇몇 경우에는, 어레이의 전극들의 최소 수는 두 개(2)이다: 송신 전극 및 수신 전극. 하지만, 다른 응용에서, 어레이는 하나 이상의 수신 전극들 및 하나의 송신 전극의 서브 세트에서 동작하는 전극들과 함께, 1-차원 어레이 또는 복수 전극들의 2-차원 어레이, 예를 들어 5 개 이상의 전극들로 구성될 수 있다.
- [0029] 이러한 예시에서, MUT(250)의 네 개의 복셀의 임피던스 특성이 측정될 수 있다. 본원에 언급된 바와 같이, 복셀은 3-차원 공간의 분수, 다시 말해, 3-차원 공간에서 정규 그리드상의 값을 나타내는 볼륨 픽셀 또는 볼륨 엘리먼트이다. 몇몇 경우에서, 복셀은 픽셀(2-차원 엘리먼트)의 3-차원 등가로서 알려져 있다. 송신된 신호의 전력과 MUT(250)를 통과하는 신호 간의 차이는 크기  $m$ 으로서 정의된다. 송신된 신호와 MUT(250)를 통과하는 신호 간의 위상 천이는 위상 각  $\varphi$  이다. 이것은 도 4의 비교기들(106)에 의해 측정된다. 이것은 복셀들 A1, A2, B1 및 B2에 대해 측정된 양이다.
- [0030] 복소 임피던스의 측정 및 해석 측면의 논의에서, 송신된 신호와 MUT를 통해 송신된 신호 간의 전력 차이의 크기  $m$  과, 송신된 신호 및 MUT를 통해 송신된 신호 간의 천이, 위상 각  $\varphi$  인, 전자기 측정 장치의 출력으로부터 계산될 수 있는 텀(terms)를 정의하는 것이 유리할 수 있다. 임피던스( $Z$ )는 실수부, 저항 및 허수부, 리액턴스로 구성된 복소 관계로서 수학적으로 나타낼 수 있다.
- [0031]  $Z = R + i X$ ;
- [0032]  $Z$  = 임피던스의 복소 값;
- [0033]  $R = m * \cos \varphi$ ; 저항;
- [0034]  $X = m * \sin \varphi$ ; 리액턴스;
- [0035] 저항  $R$ 은 전류의 흐름에 대한 물질의 저항(opposition)이다.
- [0036] 리액턴스  $X$ 는, 커패시턴스(용량성 리액턴스,  $X_C$ ) 및/또는 인덕턴스(유도성 리액턴스,  $X_L$ )로 인한 교류 전류에 대한 물질의 저항이다; 그러므로,
- [0037]  $X = X_L + X_C$ ,
- [0038] 이것은 여기에서 더 논의된다.
- [0039] 어드미턴스( $Y$ )는 임피던스의 역수인 복소수이고, 컨덕턴스 및 서셉턴스의 텀을 정의 한다:
- [0040]  $Y = 1 / Z = G + i B$ ;
- [0041] 서셉턴스( $B$ )는 어드미턴스의 텀(term)에서 리액턴스의 상보적 표현이고, 다음과 같이 수학적으로 정의된다:
- [0042]  $B = -X / (R^2 + X^2)$ ;
- [0043] 서셉턴스는 측정된 특성들로부터 다음과 같이 계산될 수 있다:

- [0044]  $B = \text{서셉턴스} = -\sin \phi / m;$
- [0045] 컨덕턴스(G)는 측정된 특성들로부터 다음과 같이 계산될 수 있다:
- [0046]  $G = \text{컨덕턴스} = \cos \phi / m.$
- [0047] 다양한 실시예의 설명에서, 임피던스 Z의 값은 MUT(예를 들어, MUT(250))에서의 복셀로 이루어진 측정 및 서브-복셀의 계산에 관련된 다양한 수학적 및 관계에 사용될 것이다. 하지만, 저항, 리액턴스, 어드미턴스, 컨덕턴스 또는 서셉턴스의 값은 아래 예시들 중 어느 것으로 임피던스를 대체 할 수 있다.
- [0048] 복소 임피던스를 MUT의 물리적 특성에 관련시키는 알고리즘을 개발하기 위해 사용되는 위의 값들 이외에, 커패시턴스는 유도 성 손실을 나타내지 않는 MUT에 대하여 사용될 수 있다. 이것은 아스팔트, 토양 및 생물학적 물질과 같은 관심 있는 많은 MUT에 대하여 일반적일 수 있다. 유도 손실이 없는 경우,  $X_L$ 은 0이 되고, 그러면  $X = X_C$ 가 된다.
- [0049] 상기 수학적식을 참조하면,
- [0050] 
$$C = (-X / (R^2 + X^2)) / \omega$$
- [0051] 여기에서 C는 캐패시턴스이고;
- [0052]  $\omega$ 는 전자기 신호의 주파수이고,
- [0053] X 및 R은 위에서 정의된 것과 같다.
- [0054] C의 값은 MUT의 물리적 특성에 다시 관련될 수 있다.
- [0055] 단층 촬영 솔루션의 경우 하나의 주파수의 데이터만을 필요로 한다는 것에 주의해야 한다. 하지만, MUT의 속성을 특징화하기 위해 분광 분석을 사용하는 경우 일정 범위의 주파수에 대한 계산을 필요로 할 수 있다. 다시 말해, 위 수학적식은 주파수 범위에 대한 임피던스 데이터를 획득하기 위해 각 주파수로부터의 데이터에 적용된다. 이후, 이러한 데이터는 아래 설명된 바와 같이 볼륨 분화 및 제거 방법(Volume Differentiation and Removal methodology)에 적용된다.
- [0056] 볼륨 분화 및 제거(Volume Differentiation and Removal; VDR) 방법에 대한 일반적인 접근법은 본원에 개시된 방법 및 다양한 어레이의 다양한 유리한 특징을 설명한다. 다음 논의에서, 대문자는 측정된 복셀을 나타내고, 소문자는 하위-복셀(모든 하위-복셀의 편집이 전체 복셀을 형성하는 복셀의 일부)을 나타낸다. 복셀 또는 서브-복셀 다음의 숫자는 MUT(예를 들어, MUT(250))를 통과하는 신호(들)을 생성/수신하는 번호가 매겨진 전극들을 나타낸다. 도 5를 참조하면, 각 전극 E1, E2, E3, E4이 송신 또는 수신 전극일 수 있는, 예시적인 네 개의 전극 선형 센서 어레이(300)가 MUT(250)(MUT(250)의 L1, L2, L3 레이어들을 포함함)를 통해 단층 촬영 신호들의 세트를 송신 또는 수신하는 것에 대하여 도시한다. 다양한 실시 예에 따르면, 임의의 측정에 대해, 하나의 송신 전극 및 하나의 수신 전극(및 이러한 예시에서 최대 세 개의 수신 전극들)을 포함하는 2-전극 쌍이 있다. 예를 들어, 송신된 단층 촬영 신호(들)의 알려진 강도 및 주파수, 송신/수신 전극들의 구성, 리턴 단층 촬영 신호(들)의 세기/주파수, 뿐만 아니라MUT(250)의 유형(예를 들어, 일반적인 조성, 알려진 물질 특성 및/또는 침투 깊이)에 기초하여, 다양한 실시예는 MUT(250)의 일부(예를 들어, 볼륨, 서브-볼륨)의 특성(예를 들어, 밀도, 조성/서브-조성 등)을 결정하는 것을 포함한다. 또한, MUT(250)에서 측정된 볼륨들 A12, A23, A34, B13, B24 및 C14이 도시된다. 측정된 볼륨은 MUT(250)의 세 개의 관심 레이어(L1, L2, L3)와 관련된다. 통신 전극들(communicating electrodes)(예를 들어, E1, E2, E3, E4)의 중심 간 간격(center-to-center spacing)은 특징화될 MUT(250)의 레이어들(L1, L2, L3)의 두께 또는 깊이에 의해 결정된다. 도 6은 도 5의 볼륨들 A, B13 및 C14의 몇몇 확대도를 도시한다. 도시된 바와 같이, 전극에 의해 검출 가능한 MUT(250)로의 깊이(D)는 통신 전극들의 중심 사이의 간격의 절반과 대략 동일하다. 도 6은 또한 측정된 복셀들 A, B 및 C의 크기의 예시를 제공한다. 도 7은 도 5의 계산된 서브-복셀들(각각 a12, b13 및 c14)과 함께 측정된 복셀들(C14, B13, A12)의 상대적 크기를 나타내는 개략도이다. 측정된 복셀 A는 계산된 서브-복셀 a와 동일한 크기이고; 복셀 B는 서브-복셀 b의 두 배 크기이고; 복셀 C는 서브-복셀 c의 세 배 크기이다. 도 8은 다양한 실시예에 따른 VDR 접근법을 더욱 상세히 설명하기 위해 사용되는 5-전극 어레이(500) 내의 서브-복셀의 배열을 나타내는 개략도이다. 더 많은 수의 레이어들을 특징화하기 위해, 더 많은 수의 전극들이 어레이에 추가될 수 있다는 것이 이해된다. 예를

들어 도 8에서, 신호를 전극1과 5 사이에 통과시킴으로써 측정된 복셀 D가 획득될 수 있다.

다양한 실시예에 따른 하나의 접근법은 복셀의 2-전극 데이터를 수집하고 복셀 데이터로부터 서브-복셀의 값을 계산하고, 복셀 세그먼트 및 복셀 데이터를 사용하여 다른 서브-복셀을 계산하기 위해 서브-복셀을 복셀 세그먼트로 결합하기 위한 것이다. 이러한 프로세스는, 도 8 및 도 9를 참조하여 도시되고 설명된 바와 같이, 4-전극 어레이(전극은 각각 원형 엘리먼트들 1, 2, 3 및 4로 표시됨)에 대응하는 서브-복셀 레이어들(a, b 및 c)을 나타내는 도 9의 개략도에 도시된다. 서브-복셀 axx의 임피던스 값은 복셀 Axx와 동일하다. 그러므로, 볼륨 B13과 B24가 등가의 물리적 특성 및 임피던스 특성을 갖는다고 가정하면, b13과 b24가 a13과 a24와 평행하다는 가정하에 서브-복셀 b13과 b24가 계산된다. 서브-복셀 a13은 A12와 A23의 직렬 조합이다. 서브-복셀 a24는 A23과 A34의 직렬 조합이다. 서브-복셀은 직렬로 조합되어 복셀 세그먼트 b를 형성한다. 복셀 세그먼트 a와 b는 서브-복셀 c14와 병렬로 결합되어 복셀 C14를 나타낸다. 도 10은 도 9의 복셀 C에 대한 등가 회로 모델(700)의 개략도를 도시한다. 등가 회로 모델(700)은 서브-복셀 c14(도 9)의 계산을 허용한다. 서브-복셀 값(c14)을 계산하기 위해 사용된 수학적 프로세스는 도 11, 도 12 및 도 13에 도시된 복셀/서브-복셀 조합의 수학적 식 및 대응하는 개략도로 도시된다.

다양한 실시예에 따라 도 11 내지 도 13에 도시된 수학적 식의 일반적인 형태는 다음과 같이 나타낸다:

$$Z_{a(n,n+1)} = Z_{A(n,n+1)}$$

$$Z_{b(n,n+2)} = \frac{(Z_{A(n,n+1)} + Z_{A(n+1,n+2)}) * Z_{B(n,n+2)}}{(Z_{A(n,n+1)} + Z_{A(n+1,n+2)}) - Z_{B(n,n+2)}}$$

$$Z_{b(n+1,n+3)} = \frac{(Z_{A(n+1,n+2)} + Z_{A(n+2,n+3)}) * Z_{B(n+1,n+3)}}{(Z_{A(n+1,n+2)} + Z_{A(n+2,n+3)}) - Z_{B(n+1,n+3)}}$$

$$Z_{a(n,n+3)} = Z_{A(n,n+1)} + Z_{A(n+1,n+2)} + Z_{A(n+2,n+3)}$$

$$Z_{b(n,n+3)} = \alpha Z_{b(n,n+2)} + (1 - \alpha) * Z_{b(n+1,n+3)}$$

$$Z_{c(n,n+3)} = \frac{Z_{a(n,n+3)} * Z_{b(n,n+3)} * Z_{C(n,n+3)}}{(Z_{a(n,n+3)} * Z_{b(n,n+3)}) - (Z_{a(n,n+3)} + Z_{b(n,n+3)}) * Z_{C(n,n+3)}}$$

다양한 실시예에 따르면, 상기 수학적 식은 MUT(예를 들어, MUT(250))의 측정된 볼륨과 그 볼륨의 복셀 및 서브-복셀의 가정된 형태 간의 차이에 대해 설명하기 위해 전극 배열의 기하학 구조에 기초하여 수정될 수 있다. 전극 배열의 기하학 구조의 상대적인 변화에 대해 설명하기 위해, 기하학적 팩터(geometry factor)가 결정될 수 있고 다음과 같이 복셀의 측정된 임피던스에 적용될 수 있다:

$$Z_{A(n,n+1)}$$

$$Z_{b(n,n+2)} = \frac{(\gamma_A Z_{A(n,n+1)} + \gamma_A Z_{A(n+1,n+2)}) * \gamma_B Z_{B(n,n+2)}}{(\gamma_A Z_{A(n,n+1)} + \gamma_A Z_{A(n+1,n+2)}) - \gamma_B Z_{B(n,n+2)}}$$

$$Z_{b(n+1,n+3)} = \frac{(\gamma_A Z_{A(n+1,n+2)} + \gamma_A Z_{A(n+2,n+3)}) * \gamma_B Z_{B(n+1,n+3)}}{(\gamma_A Z_{A(n+1,n+2)} + \gamma_A Z_{A(n+2,n+3)}) - \gamma_B Z_{B(n+1,n+3)}}$$

$$Z_{a(n,n+3)} = \gamma_A Z_{A(n,n+1)} + \gamma_A Z_{A(n+1,n+2)} + \gamma_A Z_{A(n+2,n+3)}$$

$$Z_{b(n,n+3)} = \alpha Z_{b(n,n+2)} + (1 - \alpha) * Z_{b(n+1,n+3)}$$

$$Z_{c(n,n+3)} = \frac{Z_{a(n,n+3)} * Z_{b(n,n+3)} * \gamma_C Z_{C(n,n+3)}}{(Z_{a(n,n+3)} * Z_{b(n,n+3)}) - (Z_{a(n,n+3)} + Z_{b(n,n+3)}) * \gamma_C Z_{C(n,n+3)}}$$



- [0072] 여기에서: A, B 및 C는 측정된 복셀 볼륨들이다.
- [0073] a, b 및 c 는 계산된 서브-복셀 특성들이다.
- [0074] n은 전극 어레이 넘버(number)이다.
- [0075]  $\alpha$  는  $Z \mathbf{b}(n+1, n+3)$  에 대한  $\mathbf{b}(n+1, n+3)$  의 상대적 기여도이고;
- [0076]  $\gamma_x$  는 x번째 복셀에 대한 기하학적 팩터이다. 기하학적 팩터는 평행 평면 전극  $\varepsilon$  으로 읽는 값을 상관시키기 위해 평면 전극에 적용된 보정값이다.
- [0077] 
$$\mathbf{C} = \frac{A}{d} \varepsilon \quad \mathbf{C} = \frac{A}{d} \varepsilon;$$
- [0078] 여기에서:
- [0079] C는 캐패시터이고;
- [0080]  $\varepsilon$  는 유전율이고;
- [0081] A/d는 기하학적 팩터에 대한 등가이다.
- [0082] 상술된 바와 같이 상기 VDR 방법을 적용하기 위해 사용된 임피던스 측정을 확보하는 능력은 센서 어레이의 대응하는 설계 및 동작에 의존 할 수 있다. 몇몇 어레이 설계는 앞서-언급된 특허 및 특허 출원에 이미 개시되었다. 다음 단락에서, 참조된 종래의 접근법에 비해 다양한 개선점을 제공하는 다섯 개의 선형 및 평면 전극 어레이 구성이 제시된다. 위에서 설명한 바와 같이, VDR은 각 주파수에서 각 서브-복셀에 대한 임피던스 특성을 확보하기 위해 적용된 주파수 범위 내의 각 주파수에서 각 서브-복셀에 대한 임피던스를 계산하는데 적용된다. 이후, 이러한 데이터는 MUT의 원하는 특성 또는 특성들을 특징화하기 위해 다양한 분광기 방법을 사용하여 적용될 수 있다.
- [0083] 미국 임시 특허 출원 제61/703,488에서, 센서 어레이의 움직임은 MUT에서 특징들을 검출하기 위한 방법으로서 설명된다. 도 14는 송신 및 수신 전극의 고정된 배열을 갖는 5-전극 어레이(1100)의 이동을 도시한다. 어레이(1100)는  $\Delta$ 의 전극 중심 간 간격을 갖고, v의 속도로 이동한다. 데이터는  $\delta$ 의 시간 간격으로 확보된다. 시간 간격 동안, 어레이는  $\lambda = v\delta$ 의 거리를 이동한다. B 복셀의 경우, 시간 t 및 t +  $\delta$ 에서의 두 번의 측정은 도 15의 복셀 B의 개략도에 도시된 바와 같이 3-차원 복셀을 산출한다. 도 15에 도시된 바와 같이, 복셀 B는 폭 2 $\Delta$ , 깊이  $\Delta$  및 길이  $\lambda$ 이다. 이러한 실시예에서, 이러한 3차원 복셀  $\bar{B}$ 의 임피던스 특성은, 전극의 크기 및  $\lambda$ 의 크기에 따라 변하는 기하학적 보정 팩터를 갖는  $B_t$  및  $B_{t+\delta}$  복셀의 직렬 결합으로 주어진다. 이러한 기하학적 스케일링은 실험적으로 결정될 수 있고, 다음과 같이 나타낼 수 있다:
- [0084] 
$$\bar{B} = B_t + B_{t+\delta};$$
- [0085] 3차원 복셀의 임피던스 특성이 결정되면, 서브-복셀 정보는 상술된 바와 같이 동일한 방식으로 결정될 수 있다.
- [0086] 도 14 및 도 15를 참조하여 설명된 접근법은, 송신 및 수신 전극 간격이 변하는 경우(일정하지 않은 경우) 실패할 수 있다. 다양한 실시예에 따르면, 도 8과 함께 앞서 설명된 바와 같이, 어레이의 각 전극은 송신 또는 수신할 수 있다. 이러한 이중-모드 개념(bi-modal concept)은 도 16의 더 큰 평면 어레이(1300)(5 × 1 어레이(1200)의 각각을 포함함)에서의 5 × 1 선형 어레이(1200)의 개략적인 묘사로 도시된다. 도시된 바와 같이, 5-전극 선형 어레이(1200)는 평면 어레이(1300)가 v의 속도로 이동하는 동안 송신 전극(T1, T2, T3, T4, T5)에 대한 5 가지 옵션을 스캔한다. 다양한 실시예에 따르면, 송신 전극(TX)은 각 선형 어레이(1200) 내의 5 개의 전극 각각이 5 번의 측정 간격에 걸쳐 송신되도록  $\delta$  초마다 스위칭된다. 다양한 실시예들에 따르면, 이러한 예시에서, 송신 전극 스위칭 프로세스 동안 이동되는 거리는  $\lambda = 5v\delta$ 이다. 출원인은 물리적 특성(예를 들어, 밀도, 조성, 점도 등)의 변화가 MUT에서  $\lambda$ 보다 작거나 동일한 스케일로 발생하는 경우,  $\lambda$ 의 크기가 MUT(예를 들어, MUT(250))를 정확하게 특징화 하기 위해 상술된 방법을 적용하기 위한 능력에 영향을 미칠 수 있다는 점을 발견했다. 다양한 실시예에 따르면, MUT에서의 이러한 변화는 MUT의 특성(들) 및 MUT가 검사될 수 있는 세부사항을 결정하는데 사용될 수 있다. 지속 시간  $\delta$ 는 평면 어레이(1300)(선형 어레이(1200)를 포함함)가 이동하는 속도, 어레이 전자 기기가 송신 전극들 사이에서 스위칭할 수 있는 속도 및 MUT를 특징화하기 위한 측정 데이터를 처리(예를 들어, 프로세싱은 도 22를 참조하여 본원에 설명된 바와 같이 적어도 하나의 컴퓨팅 장치를 사용하여

수행되는)하기 위해 필요한 시간에 의존한다. 전극 어레이의 수는 또한  $\lambda$ 의 결정에 영향을 줄 수 있다. 어레이(1400)의 대안적인 실시예가 도 17에 개략적으로 도시된다. 이러한 실시예에서, 어레이(1400)는 속도  $v$ 로 이동하는 것과 같이 도시된 선형 5-전극 어레이(1500)의 다섯 개의 행으로 구성된 평면 어레이를 포함한다. 각 선형 어레이(1500)의 송신 전극(TXX)은 고정되고, 반면에 각각의 송신 선형 어레이(1500)는  $\varepsilon$  Hz의 분리된 상이한 주파수에서 동작된다. 이러한 주파수 분리는, 별개의 선형 어레이(1500)로부터의 신호가 전기적으로 절연될 수 있고, 주파수의 전체 변화가 관심 있는 MUT의 물리적 파라미터의 해석을 변화시키지 않도록 크기가 정해진다. 다양한 실시 예에서, 평면 어레이(1400)의 선형 어레이(1500)의 행의 수는 각각의 선형 어레이(1500)의 전극의 수와 동일하다(예를 들어, 5개의 전극을 각각 갖는 5행의 선형 어레이(1500)).

[0087] 네 개의 선형 어레이(어레이 1, 어레이 2, 어레이 3, 어레이 4)를 사용하는, 도 18에 도시된 평면 어레이(1600)의 대안적인 실시예는, 각각의 어레이 1, 어레이 2, 어레이 3, 어레이 4에서 인접한 전극 간의 중심 간 간격으로, 인접한 어레이(1, 2, 3, 4)로부터 오프셋되는(offset) 각 어레이(1, 2, 3, 4)로 배향된다. MUT의 특성의 변화가 평면 어레이(1600)의 크기에 비해 수평면에서 작은 경우, 이러한 대안적인 실시예는 MUT의 특성을 결정하는데 유리할 수 있다. 또한, MUT의 두께(예를 들어, 특정 레이어의 두께 또는 전체 두께)가 작은 경우, 이러한 실시예는 MUT의 정확한 측정을 가능하게 할 수 있다. 예를 들어, 일부 코팅은 50마이크론 정도의 각 코팅 두께로 기계의 중요 부분에 배치된다. 이러한 예시에서, 전극 간격(각 어레이에서의)은 적어도 두 개의 코팅 레이어를 보기 위해 약 50 마이크론 정도일 수 있다. 4/7-전극 선형 어레이(four seven-electrode linear arrays)(어레이 1, 어레이 2, 어레이 3, 어레이 4)를 갖는 평면 센서 어레이(1600)의 전체 크기는 약 500 마이크론(0.02 인치) 제곱 정도일 수 있다. 이러한 유형의 평면 어레이(1600)에서, 각 어레이(어레이 1, 어레이 2 등)의 전극 수는 홀수이고, 송신 전극(T)은 각 어레이(어레이 3, 어레이 4 등) 중간 전극으로 고정된다. 도 19는 도 18의 평면 어레이(1600)의 개략도이고, 본원에 설명된 다양한 실시예에 따라 서브-복셀(예를 들어, b4, b3, b2 등)의 특성이 이러한 유형의 어레이(1600)로부터 결정될 수 있는 방법을 더 도시한다. 몇몇 실시예에 따르면, 이러한 유형의 어레이(1600)에서, 7-전극 선형 어레이(어레이 1, 어레이 2 등)의 각각은 동일한 주파수로 상이한 시간에 동작될 수 있다. 몇몇 실시 예에서, 7-전극 선형 어레이(어레이 1, 어레이 2 등)는 본원에 설명된 다양한 실시예를 참조하여 설명된 바와 같이 약간 다른 주파수에서 동시에 동작될 수 있다.

[0088] MUT의 비교적 얇은 영역을 검출하기 위해 평면 어레이(1600)의 가능한 매우 작은 크기가 주어지면, MUT의 더 큰 영역을 커버하기 위한 방법은, 도 20에 개략적으로 도시된 더 큰 검사 고정장치(larger inspection fixture)(1700) 상에 위치된 비교적 더 작은 평면 어레이(1600)의 수를 조합하는 것을 포함할 수 있다. 이러한 예시적인 도시에서, 검사 고정장치(1700)는, 1-인치 격자에 위치된 도 18 및 도 19의 평면 어레이(1600) 중 121 개를 포함한다. 다양한 실시예에 따르면, 많은 방법이 MUT의 특성을 결정하기 위해 평면 어레이(1600)를 통해 스캔하는데 이용 가능하다. 예를 들어, 각 평면 어레이(1600)는 픽셀로서 취급될 수 있고, 이 기술분야에 공지된 임의의 다양한 이용 가능한 전자 스캐닝 방법에 의해 스캐닝될 수 있다.

[0089] 도 4 내지 도 20을 참조하여 논의된 다양한 어레이에서의 개별 전극의 설계는, 원형의 형태일 수 있다. 하지만, 일부 실시예에서, MUT에서 원하는 검출 영역이 코너 또는 포인트를 포함하는 경우, 원형 전극은 이용 가능한 전계 집중(field concentration)의 가능성을 제한할 수 있다. 다양한 실시 예에서, 적어도 하나의 전극은 타원형 형태를 갖는다. 다양한 다른 실시예에서, 적어도 하나의 전극은 둥근 모서리를 갖는 직사각형 형태를 갖는다. 도 21은 다양한 실시예에 따라 본원에 도시되고 설명된 임의의 전극 어레이에 사용될 수 있는 예시적인 전극 형태의 개략도를 도시한다. 출원인은 또한 전계 집중이 전자기장을 왜곡시킬 수 있고, MUT로부터 획득된 로 데이터(raw data)에 영향을 줄 수 있다는 것을 발견했다. 따라서, 다양한 실시 예에서, 전극은 그것의 신호 발생 용량이 대응하는 수신 용량과 일치하도록 균일한 면적을 가질 수 있다. 몇몇 경우에서, 전극들의 중심 간의 거리에 관한 전극의 직경,  $\Delta$ 는 다를 수 있다. 출원인은 또한 어레이의 전자기장 강도, 어레이의 기하학적 팩터 및 어레이에 의해 획득된 측정의 신호-대-잡음비 간에 트레이드 오프가 있을 수 있다는 것을 발견했다. 출원인은 이러한 팩터가 전극의 최적 영역을 설정하기 위해 선행적(priori)으로 결정되지 않는다는 것을 추가로 발견했다.

[0090] 설명된 다양한 접근법은 MUT의 서브-복셀 또는 복수의 서브-복셀의 물리적 특성을 결정할 수 있게 한다. 다양한 실시예에서, 관심 있는 물리적 특성(들)의 복수의 측정치가 통상적인 수단에 의해 측정되고, 본원에 설명된 어레이/시스템/접근법을 사용하여 측정된(및 계산된) (복셀 및 서브-복셀의)복소 임피던스의 측정된 변화와 상관된다. 다양한 실시예에서, 측정치의 수는 결과 상관이 통계적으로 중요하도록 충분히 커질 수 있다. 임피던스 측정은 알려지지 않은 MUT를 검사하는 데 사용될 동일한 유형의 어레이로 이루어질 수 있거나, 또는 다른 실시예에서는, 평행 평면 전극 배열이 사용될 수 있다. 어레이 기하학 구조에 관계없이, 측정은 또한 주파수의 범위

에 걸쳐 이루어질 수 있다. 다른 실시예는, 분산 분석(analysis of variations; ANOVA), 신경 네트워크 및 다중 회귀 분석과 같은 여러 가지 잘 알려진 상관 방법을 사용할 수 있는, (선택된 주파수 범위에 걸쳐 복셀 또는 서브-복셀의) 측정된 임피던스에 물리적 특성을 상관시키기 위한 알고리즘을 개발하는 방법을 포함한다. 어떤 프로세스, 임피던스 특성(들) 및 주파수 범위에 대한 결정은, 통계적으로 가장 중요한 결과를 제공하는 것을 선택함으로써 최상의 적합성을 보장 할 수 있다.

[0091] 도 22는 MUT(예를 들어, 도 4의 MUT(250))의 서브복셀의 적어도 하나의 특성(예를 들어, 물리적 특성)을 결정하는 프로세스를 나타내는 흐름도이다. 제1 프로세스(1801)는 MUT의 사용을 위한 적절한 유형의 어레이를 선택하는 단계, 측정될 레이어의 전체 두께와 함께 측정될 각 레이어의 수와 두께를 선택하는 단계를 포함 할 수 있다. 개별 레이어의 수와 두께뿐만 아니라, 전체 두께는 어레이의 전극 수와 MUT의 특성을 검출하는 데 유용한 인접한 전극의 대응하는 중심 간 간격을 결정할 수 있다. 다음 프로세스(1802)는 MUT에서 관심 있는 복셀에 대한 복소 임피던스 값을 획득하기 위해 센서 어레이를 임피던스 측정 시스템(예를 들어, 적어도 하나의 컴퓨팅 장치)에 커플링하는 단계를 포함할 수 있다. 측정은 물리적 특성 알고리즘에 필요한 입력에 대응하는 주파수 범위에 걸쳐 수행될 수 있다. 다음 프로세스(1803)는 물리적 특성 알고리즘에 필요한 입력에 대응하는 주파수 범위에 걸쳐, 서브-복셀의 원하는 임피던스 특성을 계산하기 위해 본원의 다양한 실시 예들에 따라 설명된 회로 방정식을 이용하는 단계를 포함한다. 이러한 방법의 최종 프로세스(1804)는 MUT의 서브-복셀의 대응하는 특성(예를 들어, 물리적 특성)을 결정하기 위해 (다양한 실시예에 따라 설명된 물리적 특성 알고리즘과 함께) 서브-복셀 임피던스 값을 사용하는 단계를 포함 할 수 있다. 선택적 추가 프로세스(1805)는, 그 알고리즘을 적용하기 전에, 단계(1804)에 적용되는 물리적 특성 알고리즘을 개발하는 단계를 포함 할 수 있다.

[0092] 본원에 설명된 바와 같이, 본 발명의 다양한 측면은 일련의 기능을 수행하기 위한 컴퓨터 구현 방법, 시스템 및 컴퓨터 프로그램 제품을 포함 할 수 있다. 도 23은 단층 촬영을 적용한 본 발명의 다양한 실시예에 따른 방법을 나타내는 흐름도이다. 상기 방법은 전극 어레이를 사용하여 MUT의 선택 볼륨을 특징화하는 데 사용할 수 있다. 도시된 바와 같이, 흐름도는 다음을 포함하는 프로세스를 포함할 수 있다:

[0093] 프로세스 P101: 제1 단층 촬영 신호의 세트를 전극 어레이의 서브세트로부터 MUT(250)로 송신하고, 전극 어레이의 서브세트에 대한 그 주파수에서 리턴 신호를 획득하도록 신호 발생기(도 25의 센서 어레이(2120) 내의)에 명령하는 단계;

[0094] 프로세스 P102: 제1 단층 촬영 신호의 세트의 송신 후에, 제1 리턴 신호를 전극 어레이로부터 획득하는 단계;

[0095] 프로세스 P103: 제1 전극 어레이의 서브세트에 포함되지 않은 적어도 하나의 전극을 포함하는 전극 어레이의 제1 리턴 신호, 제2 리턴 신호 및 제3 복귀 신호에 기초하여, 제2 단층 촬영 신호의 세트를 전극 어레이의 제2 서브 세트로부터 MUT(250)로 송신하도록 신호 발생기(도 25의 센서 어레이(2120) 내의)에 명령하는 단계. 도 18 및 도 19를 참조하면, 전극 어레이의 구별되는 서브 세트를 도시하는 예시적인 시나리오는 제1 전극의 서브 세트, 예를 들어 어레이 4, 및 제2 전극의 서브세트, 예를 들어 어레이 2, 어레이 3 또는 어레이 1을 포함 할 수 있다. 몇몇 경우에서, 이러한 개별 어레이(어레이 1, 어레이 2 등)는 전체 평면 어레이에서 "서브-어레이"로 간주된다(도 18에 도시된 바와 같이). 몇몇 실시예에 따르면, 서브-어레이는 제 2 서브-어레이에 존재하지 않는 제1 서브-어레이에 존재하는 적어도 하나의 전극을 갖는 중첩 전극(overlapping electrodes)을 포함할 수 있다.

[0096] 프로세스 P104: 제2 단층 촬영 신호의 세트의 송신 후에, 전극 어레이에서 제2 리턴 신호를 획득하는 단계; 및

[0097] 프로세스 P105: MUT(250)의 특성을 결정하기 위해 제1 리턴 신호 및 제2 리턴 신호를 결합하는 단계. 다양한 실시예에 따르면, 제1 리턴 신호 및 제2 리턴 신호는 각각 볼륨 또는 MUT(250)의 복셀 중 적어도 하나에 대한 복소 임피던스 데이터를 포함한다. 몇몇 실시예에서, MUT(250)의 특성을 결정하기 위해 제1 리턴 신호 및 제2 리턴 신호를 결합하는 단계는, 직렬 또는 병렬 회로 이론 중 적어도 하나를 전극 어레이 내의 제1 전극 어레이의 서브세트 및 제 2 전극 어레이의 서브 세트의 위치에 기초하여 복소 임피던스 데이터에 적용하는 단계를 포함한다. 직렬 및 병렬 회로 접근법은 본원의 다양한 실시예와 관련하여 설명된다. 다양한 실시예에 따르면, 볼륨 또는 복셀 중 적어도 하나에 관한 복소 임피던스 데이터는 MUT (250)의 물리적 특성과 상관된다.

[0098] 다양한 실시예에서, 프로세스(P101) 이전에, 예비 프로세스(P100)는 MUT(250)의 복수의 레이어에 기초하여, 제1 전극 어레이의 서브세트 내의 복수의 전극 및 제2 전극 어레이의 서브세트 내의 복수의 전극을 선택하도록 명령을 제공하는 단계를 포함할 수 있다. 다양한 실시예에서, 이러한 예비 프로세스(P100)는 프로세스(P100A): 전극 어레이 내의 인접한 전극 사이의 중심 간 간격에 기초하여 제 1 서브 세트의 전극 수 및 제 2 서브 세트의 전극 수를 선택하는 단계를 포함 할 수 있다.

- [0099] 본원에 언급된 바와 같이, 다양한 실시예에 따르면, 전극들의 어레이(array of electrodes)(전극 어레이(electrode array))는 단일 주파수로 동작하도록 구성된 등 간격 전극의 선형 어레이를 포함한다. 또한, 몇몇 실시예에서, 제1 단층 촬영 신호의 세트를 송신하도록 신호 발생기(도 25의 센서 어레이(2120) 내의)에 명령하는 단계, 제1 리턴 신호를 획득하는 단계, 제2 단층 촬영 신호의 세트를 송신하도록 신호 발생기(도 25의 센서 어레이(2120) 내의)에 명령 및 제2 리턴 신호를 획득하는 단계는, 전극 어레이가 전극 어레이를 갖는 평면 공면에 병렬로 움직이는 동안 수행되고, 여기에서 제1 리턴 신호 및 제2 리턴 신호는 시간 간격  $\delta$ 로 분리된다.
- [0100] 도 24는 단층 촬영 및 분광학 모두를 적용하는 다양한 실시예에 따른 방법을 나타내는 예시적인 흐름도이다. 상기 방법은 다음을 포함할 수 있다:
- [0101] 프로세스 P200: 전극 서브세트를 포함하는 전극 어레이 내의 전극 구성을 선택하기 위한 명령을 제공하는 단계이고, 다음 중 적어도 하나에 기초한다: A) MUT(250)의 레이어 수; B) MUT(250)의 두께에 기초한 전극 사이의 중심 간 간격; C) 원하는 MUT(250) 특성/특성들의 분광기 임피던스 특성에 기초한 데이터 수집의 주파수 범위; 및/또는 D) MUT(250)의 각 복셀 및/또는 서브복셀에 대한 복소 임피던스를 계산하기 위해 직렬 및/또는 병렬 회로 접근법의 적용 요건에 기초한 전극 어레이의 서브세트 배열;
- [0102] P201: 단층 촬영 신호의 세트를 주파수 범위의 선택된 주파수에서 전극 어레이의 서브 세트로 송신하고, 리턴 신호를 획득하도록 신호 발생기(도 25의 센서 어레이(2120) 내의)에 명령하는 단계;
- [0103] P201: 전극 어레이의 모든 서브세트(200)가 샘플링 되었나?;
- [0104] P202A: D201A에 대해 NO인 경우, 전극 어레이의 다음 서브세트로 이동; P201로 되돌아 간다;
- [0105] D203: D201A에 대해 Yes인 경우, 선택된 주파수 범위의 모든 주파수가 샘플링 되었나?;
- [0106] P203A: D203에 대해 No인 경우, 선택된 주파수 범위의 다음 주파수로 이동하고, P201로 되돌아 간다;
- [0107] P204: MUT(250)의 각 복셀 및/또는 서브-복셀에 대한 복소 임피던스를 계산기 위해, 본원에 설명된 직렬 및/또는 병렬 등가 회로 접근법을 사용하여, 각 일련의 전극 어레이의 서브세트에 대한 각각의 샘플 주파수로부터의 리턴 신호를 결합하는 단계; 및
- [0108] P205: 적어도 하나의 MUT(250)의 물리적 특성을 분광학적으로 결정하기 위해 주파수 범위에 걸쳐 전극의 모든 서브세트로부터의 리턴 신호를 결합하는 단계.
- [0109] 도 25는 본 발명의 다양한 실시예에 따른 물리적 시스템(2100)의 실시예의 개략적인 측면도를 도시한다. 도 26은 본 발명의 다양한 실시예에 따른 시스템(2100)(도 25) 내의 데이터-흐름을 나타내는 개략적인 데이터-흐름도를 도시한다. 도시된 바와 같이, 도 25 및 도 26을 참조하면, 시스템 (2100)은 센서 어레이(2120)(예를 들어, 2-전극 센서 어레이와 같은 본원에 설명된 임의의 센서 어레이 구성을 포함 함) 및 변위 센서(2130)(예를 들어, 종래의 광, 온도 또는 본 기술분야에 공지된 다른 센서를 포함 함)를 포함하는 하우징(2110)을 포함할 수 있다. 하우징(2110)은 적어도 하나의 온도 센서(2140)(예를 들어, 종래의 온도 센서), 위치 추적기(2160)(위치 정보를 획득하는 GPS 및/또는 GIS 장치와 같은) 및 적어도 하나의 컴퓨팅 장치(2150)(예를 들어, 종래의 프로세서, 메모리, 입력/출력 인터페이스, 데이터 저장부 등을 포함 함)를 더 하우징할 수 있고, 이것의 각각은 종래의 유선 및/또는 무선 통신을 통해 변위 센서(2130) 및 센서 어레이(2120)와 커플링된다. 위치 추적기(2160)는 종래의 위치 추적 장치, 예를 들어 GPS 및/또는 GIS 장치를 포함 할 수 있고, 컴퓨팅 장치(2150)는, 본 기술분야에 공지된 것과 같은 시간에 상관된 위치 추적기(2160)로부터의 지리 데이터를 사용하여 하우징(2110)의 이동률(속도) 검출하도록 구성될 수 있다. 하우징(2110)은 예를 들어 힌지 메커니즘((2170)를 통해 적어도 하나의 지지 암(support arm)(2165)과 커플링될 수 있다. 적어도 하나의 지지 암(2165)은 예를 들어 추가적인 힌지 메커니즘(2170)를 통해 마운트(mount)(2180)에 커플링될 수 있다. 마운트(2180)는 예를 들어 볼트(들), 스크루(들), 클램프(들) 등을 통해 차량(3001)과 연결되도록 구성될 수 있다. 시스템(2100)은, 센서(2130)로부터의 변위 측정에 기초하여MUT(250)에 관한 하우징(2110)(및 결과적으로 센서 어레이(2120))의 위치를 수정하기 위해 지지 암(들)(2165) 중 적어도 하나와 커플링된 액추에이터(2190), 예를 들어 유압 또는 압전 액추에이터(hydraulic or piezoelectric actuator)를 더 포함 할 수 있다. 액추에이터(2190)는 적어도 하나의 컴퓨팅 장치(2150)와 통신 할 수 있고(예를 들어, 지지 암(2160)을 통한 유선 수단을 통해, 또는 무선 수단을 통해), 하우징(2110)의 위치를 수정하기 위해 컴퓨팅 장치(들)(2150)로부터 명령을 수신할 수 있다. 컴퓨팅 장치(들)(2150)는 센서 어레이(2120)와 MUT(250)(예를 들어, 아스팔트) 사이의 거리(예를 들어, 이격(standoff)(303))에 대한 변위 센서(들)(2130)로부터 데이터를 더 수집할 수 있고, 거리(303)에 대한 그 정보를



적어도 하나의 MUT(250)의 물리적 특성을 계산하기 위한 입력으로서 사용한다. 또한, 다양한 실시 예에서, 적어도 하나의 컴퓨팅 장치(2150)는 센서 어레이(2120)와 MUT(250) 사이의 거리(303)에 관한 데이터를 연속적으로 획득할 수 있고, MUT(250)의 물리적 특성에 관한 계산이 거리(303)에 대해 정확하게 고려하는 것을 확인한다. 다양한 실시예에서, MUT(250)의 단층 촬영, 차량(3001)의 이동, 하나 이상의 지지 암(2165)의 의도하지 않은 이동 등은, 센서 어레이(2120)가 MUT(250)로부터 다른 거리로 천이하도록 야기할 수 있고, 이것은 MUT(250)의 물리적 특성에 관한 계산에 영향을 줄 수 있다. 다양한 실시예에서, 원하는 거리(오프셋(offset))(303)는 알려져 있고, MUT(250)의 물리적 특성(예를 들어, 밀도)을 계산하기 위한 기초로서 사용된다. 변위 센서(들)(2130)이 원하는 오프셋(303)이 더 이상 달성되지 않도록 하우징(2110)(및 결과적으로 센서 어레이(2120))이 MUT(250)에 관하여 이동된 것을 나타내는 데이터를 제공할 때 (컴퓨팅 장치(1250)로), 컴퓨팅 장치(들)(2150)는, 원하는 오프셋(303)에서 하우징(2110)을 재정렬하기 위해 하우징(2110)의 위치를 수정하도록 액추에이터(2190)에 명령을 제공할 수 있다.

- [0110] 다양한 실시예에서, 온도 센서(2140)는 예를 들어 저장, 디스플레이 등을 위해 적어도 하나의 컴퓨팅 장치(2150)에 대한 MUT(250)(예를 들어, 아스팔트)의 온도를 검출하고 전달하도록 구성된다. 다양한 실시예에 따라, 컴퓨팅 장치(들)(2150)는 종래의 휴먼-머신 인터페이스(Human-Machine Interface; HMI) 또는 다른 종래의 인터페이스(들)를 포함 할 수 있는 적어도 하나의 인터페이스(2200)(도 26)를 포함 할 수 있다.
- [0111] 도 27은 본 발명의 실시예에 따른 방법의 다양한 프로세스를 나타내는 흐름도이다. 도시된 바와 같이, 도 17 및 도 18을 참조하면, 프로세스는 다음을 포함할 수 있다:
- [0112] 프로세스 P1: MUT(250)에 관한 센서 어레이(2120)의 위치에 대하여 변위 데이터(변위(303)에 대한)(예를 들어, 변위 센서(2130)로부터)를 획득하는 단계.
- [0113] 판정 D2: 센서 어레이(2120)가 MUT(250)에 관한 참조 거리(reference distance)에 있는지 여부를 판정하기 위해 변위 데이터(변위(303)에 대한)를 참조 변위 데이터(reference displacement data)와 비교하는 단계.
- [0114] 프로세스 P2: 센서 어레이(2120)가 참조 거리에 위치된다고 판정한 것에 응답하여, 프로세스 P2는 전자기 임피던스 신호의 세트를 MUT(250)로 송신하도록 센서 어레이(2120)에 (신호 발생기를 통해) 명령하는 단계를 포함한다.
- [0115] 프로세스 P3: MUT(250)로부터 리턴 전자기 임피던스 신호를 획득하는 단계.
- [0116] 프로세스 P4: 송신된 전자기 임피던스 신호의 세트 및 리턴 전자기 임피던스 신호에 기초하여 MUT(250)의 적어도 하나의 물리적 특성(예를 들어, 밀도)을 계산하는 단계. 프로세스 P4는 여기에서 더 설명된다.
- [0117] 프로세스 P5: 위치 추적기(2160)로부터 하우징(2110)에 대한 위치 정보(예를 들어, GPS 및/또는 GIS 데이터)를 획득하는 단계, 및 적어도 하나의 물리적 특성(예를 들어, 밀도)을 위치 정보와 상관시키는 단계.
- [0118] 프로세스 P6 (선택 사항): 적어도 하나의 물리적 특성(및 경우에 따라, 위치 정보)에 대한 데이터를 인터페이스(2200)에서 디스플레이 및/또는 기록하는 단계.
- [0119] 프로세스 P7 (판정 D2로 돌아감): 센서 어레이(2120)가 참조 거리보다 MUT(250)로부터 명확한 거리에 위치된다고 판정한 것에 응답하여, 프로세스 P3은 센서 어레이(2120)의 위치가 참조 거리와 일치하도록, 암(2165)을 통해, 액추에이터(2190)에 하우징(2110)의 위치를 수정하도록 명령하는 단계를 포함한다. 이후, 프로세스 P7은 본원에 설명된 바와 같이 프로세스 P2로 진행할 수 있다.
- [0120] 차량(3001)이 MUT(250)(예를 들어, 아스팔트)를 가로 지르면서, 프로세스 P1, 판정 D1, 프로세스 P2 및 프로세스 P7에 의해 형성된 판정 루프가 반복될 수 있고, 연속적으로(또는 미리 결정된 간격으로) 수행될 수 있다는 것이 이해된다. 다시 말해, 변위 센서(2130)는 센서 어레이(2120)에 대한 변위 데이터(303)를 연속적으로(또는 미리 결정된 간격에 따라) 획득할 수 있고, MUT(250)의 물리적 특성을 계산하기 위해 센서 어레이(2120)(및 하우징(2110))가 원하는 변위에 있는지 결정하기 위해 변위 데이터(변위(303)에 대한)를 참조 변위 데이터와 비교할 수 있다. 다양한 실시예에 따라, 적어도 하나의 컴퓨팅 장치(2150)는 센서 어레이(2120)와 MUT(250) 사이의 미리 결정된 거리(이격 (303))에 기초하여 MUT(250)의 하나 이상의 특성을 결정하도록 보정된다.
- [0121] 도 28은 다양한 실시예에 따른 또 다른 방법에서의 프로세스를 도시하는 추가적인 흐름도를 도시한다. 도시된 바와 같이, 프로세스는 다음을 포함할 수 있다:
- [0122] 프로세스 P11: MUT(250)에 대한 센서 어레이(2120)의 위치에 대한 변위 데이터(변위(303)에 대한)(예를 들어,

변위 센서(2130)로부터)를 획득하는 단계.

- [0123] 프로세스 P12: 센서 어레이(2120)에 전자기 임피던스 신호의 세트를 MUT(250)로 송신하도록 명령하는 단계.
- [0124] 프로세스 P13: MUT(250)로부터 리턴 전자기 임피던스 신호를 획득하는 단계.
- [0125] 프로세스 P14: 송신된 전자기 임피던스 신호의 세트 및 리턴 전자기 임피던스 신호에 기초하여 MUT(250)의 적어도 하나의 물리적 특성(예를 들어, 밀도)을 계산하는 단계. 프로세스 P14는 여기에서 더 설명된다.
- [0126] 프로세스 P15: 하우징(2110)에 대한 위치 정보를 획득하고, 적어도 하나의 물리적 특성(예를 들어, 밀도)을 위치 정보와 상관시키는 단계.
- [0127] 프로세스 P16 (선택 사항): 하나 이상의 물리적 특성에 대한 데이터를 인터페이스(2200)에서 디스플레이 및/또는 기록하는 단계.
- [0128] 본 발명의 다양한 실시예의 적용은 압연 동안 아스팔트 밀도의 연속 측정에 관한 것이지만, 아스팔트의 연속적인 측정 또는 모니터링에 관련된 다른 유리한 프로세스가 존재할 수 있다. 예를 들어, 책임 있는 커미셔닝 기관에 의한 새로운 아스팔트 도로의 독립적인 검사가 필요할 수 있다. 또한, 기존 도로 상태의 검사가 필요할 수도 있다. 차량에 레이저를 탑재함으로써 도로 거칠기를 검사할 수 있는 최신 방법이 있다.
- [0129] 미국 임시 출원 제61/703,488호에 설명된 바와 같이, 전자기 센서 시스템(2600)의 개략도가 도 29에 도시된다. 이러한 개략도는 세 개의 전극을 갖는 임피던스 센서 시스템을 도시한다. 두 개의 수신 전극(102) 및 그것 중 하나(101)는 다이렉트 디지털 합성기(Direct Digital Synthesizer; DDS)(107)에 의해 생성된 신호 발생기 및 비교기(103)에 의해 공급된 주파수 범위에 걸쳐, 송신 전극(101)을 통해, 신호의 입력을 제공한다. 이러한 예에서, 다른 두 개의 전극(102)은 MUT(예를 들어, 아스팔트)(302)를 통과하는 신호로 회로를 완성한다. 신호 발생기(107)(DDS)로부터의 원 신호(original signal)는, 본원에 설명된 접근법에 따라 MUT(250)을 통과하는 신호와 비교된다. 비교기(106)의 출력은, 원 신호로부터 리턴 신호의 크기 및 위상 천이의 차이이다. 송신된 신호 및 리턴 신호의 크기 및 위상 데이터는, 데이터를 처리하고 사용자 인터페이스로서 동작하거나 또는 이것을 사용자 인터페이스 또는 다른 컴퓨터 시스템에 송신할 수 있는 인터페이스 어셈블리(104)를 통해 컴퓨터 시스템(105)에 전달될 수 있다. 또한, 컴퓨터 시스템(105)은 본원에 설명된 바와 같이 생성될 주파수를 선택하도록 DDS(107)를 제어할 수 있다.
- [0130] 이러한 예에서, 전극(102)은 MUT(250)와 통신하도록 구성되지만, MUT와 물리적으로 접촉하지 않는다. 다시 말해, 그것들은 이격(303)으로 표시된 공기 갭에 의해 MUT(250)로부터 물리적으로 분리된다. 어레이의 최소 전극 수는 두 개(2)이다: 송신 전극 및 수신 전극. 하지만, 다른 응용에서, 본원에 설명된 바와 같이, 어레이는 쌍으로 동작하는 전극을 갖는 복수의 전극의 1 또는 2 차원 어레이로 구성될 수 있다.
- [0131] 이러한 예시 시스템(2600)에서, 목적은 MUT(250)의 표면으로부터 전자기 임피던스 단층 촬영 및 분광학의 조합을 사용하여 상이한 볼륨을 특징화하는 것이다. 본 개시의 다양한 실시예는 MUT(250)와 비-전기적으로(비-물리적으로) 접촉하고 MUT(250)의 표면 위에 위치되는 전극을 갖는 전자기 임피던스 분광법에 초점을 맞추고 있지만, 본 발명에서 논의된 다양한 실시예는 단층 촬영-기반 접근법을 사용하여 적용될 수도 있다. 도 5에 도시된 전극 쌍의 선택은, 특징화될 MUT(250)의 깊이 및 이격(303)에 기초된다. 이격을 포함하는 측정의 깊이는 송신 전극 및 수신 전극의 중심 간 간격 사이의 거리의 절반과 대략 동일하다는 것이 본 기술분야에 공지되어 있다.
- [0132] 도 30은 도 29의 전자기 센서 어레이 시스템(2600)의 부가적인 세부사항의 설명을 포함하는 데이터-흐름도를 제공한다. 하나의 구성은 두 개의 전극, 송신 전극(101) 및 수신 전극(102)을 포함한다. 제2 수신 전극(102)은, MUT(250)의 상이한 깊이에 대한 측정을 제공하기 위한 도 29에 도시된 바와 같이 전극 어레이의 일부일 수 있다. 송신 전극(101) 및 수신 전극(102)은 각각 신호 발생기 및 비교기(103)에 연결되고, 이것은 도 26에서 더욱 상세히 도시되었다. 신호 발생기 및 비교기(103)는 수신 전극(102)으로부터 인터페이스 어셈블리(104)로 수신된 전자기 신호를 전달한다. 인터페이스 어셈블리(104)는 또한 지지 구조(어셈블리)(200) 및 차량(301)으로부터 정보를 수신한다. 지지 구조(어셈블리)(200)는 변위 센서(201)(도 31)로부터의 위치 데이터 및 온도 센서(204)로부터의 온도 데이터를 전달할 수 있다. 롤러 또는 차량(301)은 롤러 또는 차량 속도, 방향 및 센서 어레이 시스템에 대한 GPS 위치 및 시간뿐만 아니라 전력에 대한 데이터를 제공할 수 있다. 인터페이스 어셈블리는 또한 신호 발생기와 비교기 및 컴퓨터 시스템 사용자 인터페이스(105) 간의 통신을 위한 경로를 제공한다. 인터페이스 어셈블리는 컴퓨터 시스템(105)과 통신하여, 신호 발생기, 지지 구조 및 롤러 또는 차량(301)으로부터의 데이터를 송신한다. 인터페이스 어셈블리는 또한 다른 컴퓨터 시스템 및 데이터 저장 시스템(109)과 통신할 수

있다. 컴퓨터 시스템 사용자 인터페이스(105)는 GIS 관리 시스템(304)과 통신 할 수 있다. 컴퓨터 시스템은 GIS로부터 위치 및 시간 데이터를 수신할 수 있고, 밀도 관련 데이터를 GIS에 제공할 수 있다. 컴퓨터 시스템은 또한 다른 컴퓨터 시스템 및 데이터 저장 시스템과 통신 할 수 있다. 전자기 선형 센서 어레이 어셈블리의 다양한 엘리먼트들은 물리적으로 결합될 수 있다.

[0133] 도 31은 지지 구조 어셈블리(200)의 동작을 도시한다. 변위 센서 시스템(201)은 이격(303)을 감지한다. 이것은 컴퓨터 시스템(203)에 전달된다. 컴퓨터 수단은, 원하는 이격을 달성하기 위해 적절한 조정을 하도록 측정 이격을 원하는 이격과 비교하고, 액추에이터(202)에 대한 신호를 감지한다. 복수의 변위 센서가 있을 수 있고, 그것 중 하나가 제어를 위한 주요 측정으로 설정될 수 있거나 모든 판독 값의 평균이 사용될 수 있다. 센서 어레이 주위에 네 개의 직각 위치에 네 개의 변위 센서가 있는 경우, 측정치가 센서 어레이의 피치(pitch) 또는 롤(roll)을 결정하기 위해 사용될 수 있다. MUT로 센서 어레이의 평행 배향으로부터의 피치와 롤의 보정은 제어를 위해 복수의 액추에이터를 사용할 수 있다. 지지 구조 어셈블리(200)는 MUT(250)(예를 들어, 아스팔트)의 온도를 감지하기 위해 온도 센서(204)를 포함 할 수 있다. 지지 구조 컴퓨터 시스템(203)은 센서 인터페이스 어셈블리(104)와 통신한다.

[0134] 도 32는 센서 어레이(2120)(도 25)의 전극의 다양한 예시적인 형태를 도시한다. 다양한 실시예에서, 각 전극이 임의의 포인트 또는 코너를 갖지 않도록, 전극은 둥근 프로파일(rounded profiles)을 갖는다. 다양한 예시적인 형태는 다음을 포함한다: 원형, 둥근 모서리를 갖는 직사각형, 타원형. 전극 기하학 구조의 선택은 두 가지 기준에 의해 결정될 수 있다: 1) 각 전극의 총 표면적 및 b) 인접한 전극 사이의 중심 간 간격. 다양한 실시예에서, 전극의 총 표면적은 MUT(250)의 측정된 볼륨의 총 임피던스 또는 커패시턴스를 정의한다. 대부분의 경우, 시스템의 임피던스 또는 커패시턴스 범위가 높을수록 판독의 정밀도가 향상된다. 한편, 본원에 언급된 바와 같이, 종래 기술은 샘플링될 수 있는 MUT(250)로의 깊이가 전극의 중심 간 간격에 의존한다는 것을 보여 주었다. 원형 전극 기하학 구조는 주어진 전극 간격에 대한 더 큰 전극 영역을 제공할 수 있는 타원형 또는 둥근-사각형 설계에 비해, 주어진 전극 영역에 대한 전극 사이의 간격을 제한한다.

[0135] 또한, 도 33a 및 도 33b는 본 발명의 다양한 실시예에 따라 차량(301)에 사용하기 위한 프로토타입 선형 어레이를 도시하는 이미지를 나타낸다. 도 33a는 가시적인 세 개의 원형 전극을 갖는 센서 어셈블리의 하면도를 도시한다. 도 33b는, 센서 어레이를 위한 실드를 제공하는 전도성 덮개를 포함하는 도 33a의 센서 어셈블리의 투시도를 도시한다.

[0136] 또한, 도 34a 및 도 34b는 다양한 실시예에 따른, 롤러 상에 탑재된 프로토타입 제어 가능 지지 구조의 이미지를 나타낸다. 여기에 탑재된 전자기 센서는 MUT(예를 들어, 아스팔트)의 물리적 특성(예를 들어, 밀도)의 연속적인 모니터링을 위한 비-접촉 센서로서의 사용을 위해 설계되지 않은 현재 상용 장치이다. 도 34a는 롤러 상에 탑재된 프로토타입 제어가능 지지 구조의 측면도를 도시한다. 도 34b는 액추에이터 및 더욱 명확하게 가시적인 전자기 센서를 갖는 제어 가능 지지 구조의 확대 측면도이다.

[0137] 도 35는 종래 기술의 고속도로 검사 차량의 이미지를 도시한다. 뱀은 뱀의 뒤를 캔틸레버 오프(cantilevered off)하는 지표 투과 레이더(Ground Penetrating Radar; GPR)를 갖는다. 포장도로 위의 GPR 유닛의 높이는 제어되거나 측정되지 않는다. 일반 고속도로 차량-유형 이동은 포장도로와 GPR 유닛 사이의 거리를 상당히 변화시킨다. 다행히, GPR은 이러한 변화에 매우 민감하지 않다. 하지만, 본원에 언급된 바와 같이, GPR은 밀도와 같은 물리적 특성 측정에서의 비신뢰성과 같은 다양한 단점을 갖는다.

[0138] 도 36은 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 시스템(3600)을 나타낸다. 시스템(3600)의 이러한 실시예에서, 지지 구조(200)는, 예를 들어 바퀴/롤러에 장착되기 때문에 포장도로 위의 고정된 높이에 위치된다. 이것은 MUT(250)와 센서 어레이(100) 사이의 이격(303)을 명목상으로 고정한다. 하지만, 포장 프로세스 중 센서 어레이가 롤러 상에 탑재되는 경우와 달리, 포장도로 표면이 평탄하다는 것을 가정할 수 없다. 본원에 설명된 다른 실시예에서, 변위 센서 및 액추에이터는 MUT(250) 위의 센서의 위치를 제어하는데 사용된다. 하지만, 시스템(3600)에서, 명목상 고정된 이격으로부터의 변화를 포장도로 표면으로부터 결정하는 변위 센서(201)도 있다. 시스템(3600)은 MUT(250)에 대한 센서 어레이(100)의 변위를 결정하는데 충분한 임의의 수의 변위 센서(201)를 포함할 수 있다. 하지만, 본원에 설명된 다양한 시스템에 적용 가능한 하나의 특정 실시예는 네 개의 개별 변위 센서(201)를 포함한다: 하나의 전면 센서, 하나의 후면 센서, 하나의 좌측 센서 및 하나의 우측 센서. 다양한 실시예에서, 네 개의 변위 센서(201)를 갖는 것은, 시스템(3600)이 센서 어레이(100)의 네 변의 각각의 위치를 결정할 수 있게 하고, 이것은 센서 어레이(100)가 MUT(250)의 표면과 실질적으로 평행한지 여부, 또는 센서 어

레이(100)가 MUT(250)에 관하여 소정 각도에(기울어져) 있는지 여부를 나타낼 수 있다.

[0139] 변위 센서(201)로부터의 측정은 MUT(250)의 물리적 특성(예를 들어, 밀도)의 결정을 위한 알고리즘에서 고려될 수 있다. 센서(201)의 임피던스 또는 커패시턴스의 측정은 에어 갭 커패시터와 MUT 커패시터로 구성된 두 개의 직렬 커패시터의 합으로서 모델링될 수 있다. 이러한 직렬 커패시터의 결합된 커패시턴스는 다음 수학적식으로 주어진다:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_{Air}} + \frac{1}{C_{MUT}}$$

[0141] 평행 평면 커패시터의 커패시턴스는 다음으로 주어진다:

$$C = \epsilon \frac{A}{D}$$

[0143] 여기에 제시된 평면 센서 어레이의 기하학 구조는 정확하게 평행 평면은 아니지만, 평행 평면 커패시터의 모델로 근사될 수 있다. 이격 거리의 작은 변화에 대한 1차 보정에서, 커패시턴스의 변화는 스탠드 오프의 변화에 직접적으로 관련될 수 있다.

[0144] 커패시턴스 값이 이격의 변화에 대해 어떻게 조정될 수 있는지에 대한 예시로서, 다음으로 나타낼 수 있다:

$$C_T = \epsilon_T \frac{A}{\Delta}$$

$$C_{AIR} = \epsilon_{AIR} A / d_{AIR}$$

$$C_{MUT} = \epsilon_{MUT} A / d_{MUT}$$

$$C_{MUT} = (C_T * C_{AIR}) / (C_{AIR} - C_T)$$

$$d_{AIR} = \delta_h * h$$

$$d_{MUT} = \Delta - d_{Air}$$

[0151] 여기에서:

[0152] C는 공기로 인한 컴포넌트 및 MUT로 인한 컴포넌트의 전체 측정의 캐패시턴스;

[0153]  $\epsilon$  은 공기로 인한 컴포넌트 및 MUT로 인한 컴포넌트의 전체 측정의 유전율;

[0154]  $\Delta$  는 전극의 중심 간 간격;

[0155]  $h$  는 이격 거리;

[0156]  $\epsilon \delta_h$  는 표면으로부터 어레이의 이격 거리에 대한 설계 팩터;

[0157]  $d_{AIR}$  는 설계 이격 거리(303); 및

[0158]  $d_{MUT}$  는 MUT로의 측정의 설계 깊이이다.

[0159] 보정 팩터는 설계 조건으로부터의 변화에 대해 설명하기 위해 정의될 수 있고, 다음과 같이 적용된다:

$$g = d_{AIR} / (d_{AIR} + \delta)$$

$$C_{MUT} = (C_T - C_{AIR} * g) / (C_T * C_{AIR} * g)$$

[0161] 이격의 변화의 영향을 모델링하는 다른 방법은 당업자에 의해 개발될 수 있고, 아스팔트 밀도의 계산을 위한 알고리즘에 통합될 수 있다.

[0162] 도 37 및 도 38은 본원에 설명된 시스템이 예를 들어 도 26의 실시예의 탑재 구성과 같은 유사한 방식으로 장착



될 수 있는 다양한 포장도로 검사 차량의 이미지를 도시한다.

- [0163] 본 발명의 다양한 실시예의 적용은 압연 중 아스팔트 밀도의 연속 측정에 관한 것이지만, 아스팔트의 밀도의 연속 측정 또는 모니터링에 관련된 다른 유리한 프로세서가 존재할 수 있다. 예를 들어, 책임 있는 커미셔닝 기관에 의한 새로운 아스팔트 도로의 독립적인 검사가 필요할 수 있다. 또한, 기존 도로 상태의 검사가 필요할 수도 있다. 차량에 레이저를 탑재함으로써 도로 거칠기를 검사 할 수 있는 최신 방법이 있다.
- [0164] 본원에 설명된 바와 같이, 다양한 측면은 일련의 기능을 수행하기 위한 컴퓨터 구현 방법, 시스템 및 컴퓨터 프로그램 제품을 포함 할 수 있다. 몇몇 경우에는, 도 39에 도시된 바와 같이, 시스템(4000)은 MUT(250)(MUT(250)의 표면 아래)와 통신하기 위한 (전도성 또는 비-전도성으로) 전극 어레이(4003)(예를 들어, 전극 쌍 (203, 303, E1/E3 및 E2 / E4) 또는 센서 어레이(2120), 센서 어레이(100) 등)를 포함한다. 본원에 기술된 바와 같이, 전극 어레이(4003)는 MUT(250)의 선택된 볼륨의 특성을 잠재적으로 결정하고, 검출하기 위한 복수의 별개의 방법으로 구성될 수 있다. 시스템(4000)은, 전극 어레이(4003)와 동작 가능하게 연결된(예를 들어, 유선) 신호 발생기(몇몇 경우에는 분석기를 포함함)(4005)를 더 포함할 수 있다. 시스템(4000)은 신호 발생기(405)와 동작 가능하게 연결된(예를 들어, 무선 및/또는 유선) 적어도 하나의 컴퓨팅 장치(4007)를 더 포함 할 수 있다. 적어도 하나의 컴퓨팅 장치(4007)는 본원에 설명된 바와 같이 다양한 프로세스를 수행하도록 구성된다.
- [0165] 도 39를 참조하여, 다양한 실시예와 관련하여 본원에 설명된 프로세스를 수행함으로써 테스트 대상 재료(Material Under Test; MUT)(250)의 선택 볼륨을 특징화하기 위한 시스템(4000)이 더욱 상세히 도시된다. 이러한 범위에서, 시스템(4000)은 센서 어레이 시스템(예를 들어, 도 25의 센서 어레이(2120)를 포함 할 수 있는 전극 어레이(4003) 또는 도 36의 센서 어레이(100)), 신호 발생기/분석기(4005) 및/또는 디스플레이(4009)를 포함 할 수 있다. 특히, 컴퓨터 시스템(4002)은 본원에 설명된 임의의/모든 프로세스를 수행하고, 본원에 설명된 임의의/모든 실시예를 구현함으로써 MUT를 특징화하도록 컴퓨터 시스템(4002)을 동작 가능하게 하는 MUT 특징화 시스템(4018)을 포함하는 것으로 도시된다.
- [0166] 프로세싱 컴포넌트(4004)(예를 들어, 하나 이상의 프로세서), 저장 컴포넌트(4006)(예를 들어, 저장 계층 구조), 입력/출력(I/O) 컴포넌트(4008)(예를 들어, 하나 이상의 I/O 인터페이스 및/또는 장치) 및 통신 경로(4010)를 포함 할 수 있는 컴퓨팅 장치(4007)를 포함하는 것으로 도시된다. 일반적으로, 프로세싱 컴포넌트(404)는 적어도 부분적으로 저장 컴포넌트(4006)에 고정된 MUT 특징화 시스템(4018)과 같은 프로그램 코드를 실행한다. 프로그램 코드를 실행하는 동안, 처리 컴포넌트(4004)는, 저장 컴포넌트(4006) 및/또는 I/O 컴포넌트(4008)로부터/로 변환된 데이터를 판독 및/또는 기록할 수 있게 하는 데이터를 처리할 수 있다. 경로(4010)는 컴퓨터 시스템(4002) 내의 각각의 컴포넌트들 간의 통신 링크를 제공한다. I/O 컴포넌트(4008)는 하나 이상의 휴먼 I/O 장치를 포함할 수 있고, 이것은 사용자(예를 들어, 사람 및/또는 컴퓨터 사용자)(4012)가 컴퓨터 시스템(4002) 및/또는 하나 이상의 통신 장치와 상호 작용하여 시스템 사용자(4012)가 임의의 유형의 통신 링크를 사용하여 컴퓨터 시스템(4002)과 통신 할 수 있게 한다. 이러한 범위에서, MUT 특징화 시스템(4018)은 인간 및/또는 시스템 사용자(4012)가 MUT 특징화 시스템(4018)과 상호 작용할 수 있게 하는 인터페이스의 세트(예를 들어, 그래픽 사용자 인터페이스(들), 애플리케이션 프로그램 인터페이스 등)를 관리 할 수 있다. 또한, MUT 특징화 시스템(4018)은 임의의 해결방안을 사용하여 측정된 센서 데이터(4060) 및/또는 계산된 특성 데이터(4062)와 같은, 데이터를 관리(예를 들어, 저장, 검색, 생성, 조작, 구성, 표시 등)할 수 있다. 센서 데이터(4060)는 MUT(250)에 대한 전극 어레이(예를 들어, 쌍(들))(4003)에 의해 획득된 데이터를 포함할 수 있는 것으로 이해된다. 계산된 특성 데이터(4062)는 MUT(250)의 하나 이상의 물리적 특성을 포함할 수 있다. MUT 특징화 시스템(4018)은, 예를 들어 무선 및/또는 유선 수단을 통해, 신호 발생기/분석기(4003), 사용자(4012) 및/또는 디스플레이(4009)와 추가적으로 통신할 수 있다.
- [0167] 임의의 경우에, 컴퓨터 시스템(4002)은, 그 위에 설치된 MUT 특징화 시스템(4018)과 같은 프로그램 코드를 실행 할 수 있는 하나 이상의 범용 컴퓨팅 제품(예를 들어, 컴퓨팅 장치)을 포함 할 수 있다. 본원에 사용된 바와 같이, "프로그램 코드"는, 정보 처리 능력을 갖는 컴퓨팅 장치가 직접적으로 또는 다음의 임의의 조합 후에 특정 기능을 수행하게 하는 임의의 언어, 코드 또는 표기법으로된 임의의 명령 집합을 의미하는 것으로 이해된다: (a) 또 다른 언어, 코드 또는 표기법으로의 변환; (b) 다른 자료 형태로 재생산; 및/또는 (c) 압축(decompression). 이러한 범위에서, MUT 특징화 시스템(4018)은 시스템 소프트웨어 및/또는 애플리케이션 소프트웨어의 임의의 조합으로서 구현될 수 있다. MUT 특징화 시스템(4018)은 클라우드-기반 컴퓨팅 환경에서 구현 될 수 있다. 여기에서 하나 이상의 프로세스는 별개의 컴퓨팅 장치(예를 들어, 복수의 컴퓨팅 장치(4007))에서 수행되고, 여기에서 이러한 별개의 컴퓨팅 장치들 중 하나 이상은 도 39의 컴퓨팅 장치(4007)와 관련하여 도시

되고 설명된 컴포넌트들 중 일부만을 포함할 수 있다.

- [0168] 또한, MUT 특징화 시스템(4018)은 모듈의 세트(4032)를 사용하여 구현될 수 있다. 이러한 경우에, 모듈(4032)은 컴퓨터 시스템(4002)이 MUT 특징화 시스템(4018)에 의해 사용되는 작업의 세트를 수행하게 할 수 있고, 개별적으로 개발될 수 있고, 또는/추가로 MUT 특징화 시스템(4018) 및/또는 MUT 특징화 시스템(4018)의 다른 부분들과 별도로 구현될 수 있다. 본원에 사용된 바와 같이, 용어 "컴포넌트"는 임의의 해결방안을 사용하여 함께 설명된 기능을 구현하는 소프트웨어가 존재하거나 존재하지 않는 하드웨어의 임의의 구성을 의미하고, "모듈"이라는 용어는 컴퓨터 시스템(4002)이 임의의 해결방안을 사용하여 함께 설명된 기능을 구현할 수 있게 하는 프로그램 코드를 의미한다. 처리 컴포넌트(4004)를 포함하는 컴퓨터 시스템(4002)의 저장 컴포넌트(4006)에 고정될 때, 모듈은 그 기능을 구현하는 컴포넌트의 중요한 부분이다. 그럼에도 불구하고, 둘 이상의 컴포넌트, 모듈 및/또는 시스템이 각각의 하드웨어 및/또는 소프트웨어의 일부/전부를 공유할 수 있다는 것이 이해된다. 또한, 본원에서 논의된 기능성 중 일부는 구현되지 않거나 또는 추가적인 기능성이 컴퓨터 시스템(4002)의 일부로서 포함될 수 있다는 것이 이해된다.
- [0169] 컴퓨터 시스템(4002)이 복수의 컴퓨팅 장치를 포함하는 경우, 각 컴퓨팅 장치는 그 위에 고정된 MUT 특징화 시스템(4018)의 일부만(예를 들어, 하나 이상의 모듈(4032))을 가질 수 있다. 하지만, 컴퓨터 시스템(4002) 및 MUT 특징화 시스템(4018)은 본원에 설명된 프로세스를 수행할 수 있는 다양한 가능한 등가의 컴퓨터 시스템을 나타낼 뿐인 것으로 이해된다. 이러한 범위에서, 다른 실시예에서, 컴퓨터 시스템(4002) 및 MUT 특징화 시스템(4018)에 의해 제공되는 기능은 프로그램 코드가 존재하거나 또는 존재하지 않는 일반 및/또는 특정 목적 하드웨어의 임의의 조합을 포함하는 하나 이상의 컴퓨팅 장치에 의해 적어도 부분적으로 구현될 수 있다. 각 실시예에서, 하드웨어 및 프로그램 코드는, 포함되는 경우, 각각 표준 엔지니어링 및 프로그래밍 기술을 사용하여 생성될 수 있다.
- [0170] 그럼에도 불구하고, 컴퓨터 시스템(4002)이 복수의 컴퓨팅 장치를 포함할 때, 컴퓨팅 장치는 임의의 유형의 통신 링크를 통해 통신할 수 있다. 또한, 여기에 설명된 프로세스를 수행하는 동안, 컴퓨터 시스템(4002)은 임의의 유형의 통신 링크를 사용하여 하나 이상의 다른 컴퓨터 시스템과 통신할 수 있다. 어느 경우에, 통신 링크는 다양한 유형의 유선 및/또는 무선 링크의 임의의 조합을 포함할 수 있고; 하나 이상의 유형의 네트워크의 임의의 조합을 포함할 수 있고; 및/또는 다양한 유형의 송신 기술 및 프로토콜의 임의의 조합을 활용할 수 있다.
- [0171] 컴퓨터 시스템(4002)은 임의의 해결방안을 사용하여 센서 데이터(4060) 및/또는 계산된 물리적 특성 데이터(4062)와 같은 데이터를 획득하거나 제공할 수 있다. 컴퓨터 시스템(4002)은 하나 이상의 데이터 저장부로부터 센서 데이터(4060) 및/또는 계산된 특성 데이터(4062)를 생성할 수 있고, 전극 어레이(4003), 신호 발생기/분석기(4005), 사용자(4012) 및/또는 디스플레이(4009)와 같은 또 다른 시스템으로부터 센서 데이터(4060) 및/또는 계산된 특성 데이터(4052)를 수신할 수 있고, 센서 데이터(4060) 및/또는 계산된 특성 데이터(4062)를 또 다른 시스템 등으로 전송할 수 있다.
- [0172] MUT를 특징화하기 위한 방법 및 시스템으로서 본원에 도시되고 설명되었지만, 본 발명의 측면들은 다양한 대안적인 실시예들을 더 제공한다는 것이 이해된다. 예를 들어, 일 실시예에서, 본 발명은, 실행될 때 컴퓨터 시스템이 MUT의 적어도 일부를 검출하고 특징화할 수 있게 하는 적어도 하나의 컴퓨터-판독 가능 매체에 고정된 컴퓨터 프로그램을 제공한다. 이러한 범위에서, 컴퓨터-판독 가능 매체는 본원에 설명된 프로세스들 및/또는 실시예의 일부 또는 전부를 구현하는 MUT 특징화 시스템(4018)(도 39)과 같은 프로그램 코드를 포함한다. "컴퓨터 판독 가능 매체"라는 용어는 현재 알려진 또는 나중에 개발될 임의의 유형의 실체 표현 매체 중 하나 이상을 포함하고, 이것으로부터 프로그램 코드의 사본이 컴퓨터 장치에 의해 인식, 재생 또는 전달될 수 있다는 것이 이해된다. 예를 들어, 컴퓨터-판독 가능 매체는 다음을 포함할 수 있다: 하나 이상의 휴대용 저장 제품; 컴퓨팅 장치의 하나 이상의 메모리/저장 컴포넌트; 종이; 등.
- [0173] 다른 실시예에서, 본 발명은 본원에 설명된 프로세스의 일부 또는 전부를 구현하는 MUT 특징화 시스템(4018)(도 39)과 같은 프로그램 코드의 사본을 제공하는 방법을 제공한다. 이러한 경우에, 컴퓨터 시스템은, 제2의, 별개의 위치에서의 수신을 위해, 데이터 신호들의 세트에서 프로그램 코드의 사본을 인코딩하는 방식으로 설정되고 또는/추가로 변경되는 특성들 중 하나 이상을 갖는 데이터 신호들의 세트를 생성하고 송신하기 위해 본원에 기술된 프로세스의 일부 또는 전부를 구현하는 프로그램 코드의 사본을 처리할 수 있다. 유사하게, 본 발명의 일 실시예는 본원에 설명된 데이터 신호의 세트를 수신하는 컴퓨터 시스템을 포함하는 본원에 설명된 프로세스의 일부 또는 전부를 구현하는 프로그램 코드의 사본을 획득하고, 적어도 하나의 컴퓨터-판독 가능 매체에 고정된

컴퓨터 프로그램의 사본으로 데이터 신호의 세트를 송신하는 방법을 제공한다. 어느 경우에, 데이터 신호의 세트는 임의의 유형의 통신 링크를 사용하여 송신/수신될 수 있다.

[0174] 또 다른 실시예에서, 본 발명은 MUT를 특정화하기 위한 시스템을 생성하는 방법을 제공한다. 이러한 경우에, 컴퓨터 시스템(4002)(도 39)과 같은 컴퓨터 시스템이 획득될 수 있고(예를 들어, 생성, 유지, 이용 가능해질 수 있음), 본원에 설명된 프로세스를 수행하기 위한 하나 이상의 컴포넌트가 획득될 수 있고(예를 들어, 생성, 구매, 사용, 수정 등), 컴퓨터 시스템에 배치될 수 있다. 이러한 범위에서, 배치는 다음 중 하나 이상을 포함할 수 있다: (1) 컴퓨팅 장치 상에 프로그램 코드를 설치하는 것; (2) 하나 이상의 컴퓨팅 및/또는 I/O 장치를 컴퓨터 시스템에 추가하는 것; (3) 컴퓨터 시스템이 본원에 설명된 프로세스를 수행할 수 있도록 컴퓨터 시스템을 통합 및/또는 수정하는 것; 등.

[0175] 임의의 경우에, 예를 들어 MUT 특성화특징화 시스템(4018)을 포함하는 본 발명의 기술적 효과는, 여기에 설명되고 도시된 다양한 방식 중 하나로 MUT(250)의 적어도 부분을 특정화하기 위해 전국 어레이(4003), 신호 발생기/분석기(4005), 사용자(4012) 및/또는 디스플레이(4009)의 동작을 제어하는 것이다.

[0176] 다양한 실시예에서, 서로 "커플링된(coupled)"것으로 설명된 컴포넌트는 하나 이상의 인터페이스를 따라 결합될 수 있다. 몇몇 실시예에서, 이러한 인터페이스는 별개의 컴포넌트 사이의 접합을 포함할 수 있고, 다른 경우에는, 이러한 인터페이스는 견고하고 또는/추가로 일체적으로 형성된 상호연결을 포함할 수 있다. 다시 말해, 몇몇 경우에는 단일 연속 멤버를 정의하도록 서로 "결합된" 컴포넌트가 동시에 형성될 수 있다. 하지만, 다른 실시예에서, 이러한 커플링된 컴포넌트는 별개의 멤버로서 형성될 수 있고, 공지된 프로세스(예를 들어, 파스닝(fastening), 초음파 용접(ultrasonic welding), 본딩(bonding))을 통해 이후 접합될 수 있다.

[0177] 본원에서 사용되는 용어는 단지 특정 예시적인 실시예를 설명하기 위한 것이고, 제한하려는 것은 아니다. 본원에서 사용된 단수 형태 "a", "an"및 "the"는 문맥 상 다르게 지시하지 않는 한, 복수 형태를 포함하는 것으로 의도될 수 있다. "포함한다(comprises)", "포함하는(comprising)", "포함하는(including)"및 "갖는(having)"이라는 용어는 포괄적이고, 그러므로 명시된 특징, 정수, 단계, 동작, 엘리먼트 및/또는 컴포넌트의 존재를 명시하지만, 하나 이상의 다른 특징, 정수, 단계, 동작, 엘리먼트, 컴포넌트 및/또는 이것의 그룹의 존재 또는 추가를 배제하지 않는다. 본원에 설명된 방법 단계, 프로세스 및 동작은 수행의 순서로서 구체적으로 식별되지 않는 한, 논의되거나 도시된 특정 순서로의 수행을 반드시 요구하는 것으로 해석되어서는 안 된다. 부가적인 또는 대안적인 단계들이 적용될 수 있다는 것이 또한 이해된다.

[0178] 엘리먼트 또는 레이어가 다른 엘리먼트 또는 레이어의 "위에(on)", "결합된(engaged to)", "연결된(connected to)"또는 "커플된(coupled to)" 것으로 언급되는 경우, 다른 엘리먼트 또는 레이어에 직접적으로 위에, 결합된, 연결된 또는 커플된 것일 수 있거나, 또는 사이에 있는 엘리먼트 또는 레이어가 존재할 수 있다. 대조적으로, 엘리먼트가 다른 엘리먼트 또는 레이어에 "직접적으로 위에(directly on)", "직접적으로 결합된(directly engaged to)", "직접적으로 연결된(directly connected to)"또는 "직접적으로 커플된(directly coupled to)" 것으로 언급되는 경우, 사이에 있는 엘리먼트 또는 레이어가 존재하지 않을 수 있다. 엘리먼트들 간의 관계를 설명하기 위해 사용된 다른 단어들은 동일한 방식(예를 들어, "사이에(between)" 대 "직접적으로 사이에(directly between)", "인접한(adjacent)" 대 "직접적으로 인접한(directly adjacent)" 등)으로 해석되어야 한다. 본원에 사용된 바와 같이, "및/또는"이라는 용어는 하나 이상의 관련된 열거 항목의 임의 및 모든 조합을 포함한다.

[0179] "내부(inner)", "외부(outer)", "밑(beneath)", "아래(below)", "하부(lower)", "위(above)", "상부(upper)" 등과 같이, 공간적 관련된 용어는 도면에 도시된 바와 같이 다른 엘리먼트(들) 또는 특징(들)에 대한 하나의 엘리먼트 또는 특징의 관계를 설명하기 위한 묘사의 용의성을 위해 본원에 사용될 수 있다. 공간적으로 상대적인 용어는 도면에 도시된 방향뿐만 아니라 사용 또는 동작에서 장치의 상이한 방향을 포함하도록 의도될 수 있다. 예를 들어, 도면의 장치가 뒤집힌 경우, 다른 엘리먼트 또는 특징의 "아래"또는 "밑"으로 설명된 엘리먼트는 다른 엘리먼트 또는 특징의 "위에" 배향될 것이다. 그러므로, 예시적인 "아래"라는 용어는 위와 아래의 방향 모두를 포괄할 수 있다. 상기 장치는 다른 방향으로 배향될 수 있고(90도 또는 다른 방향으로 회전됨), 본에서 사용되는 공간적으로 상대적인 기술어는 그에 따라 해석될 수 있다.

[0180] 이러한 서술된 설명은 최상의 모드를 포함하여 본 발명을 개시하기 위한 예시를 사용하고, 또한 임의의 장치 또는 시스템을 제작 및 사용하고 임의의 통합된 방법을 수행하는 것을 포함하는 본 발명을 당업자가 실시할 수 있게 한다. 본 발명의 특허 가능한 범위는 청구 범위에 의해 규정되며, 당업자에게 발생할 수 있는 다른 예시를 포함할 수 있다. 이러한 다른 예시는, 청구 범위의 문자적 언어와 다른 구조적 엘리먼트를 갖는 경우, 또는 청



구 범위의 문자적 언어와 실질적으로 다른 차이를 갖는 등가의 구조적 엘리먼트를 포함하는 경우, 청구 범위의 범위 내에 있는 것으로 의도된다.

도면

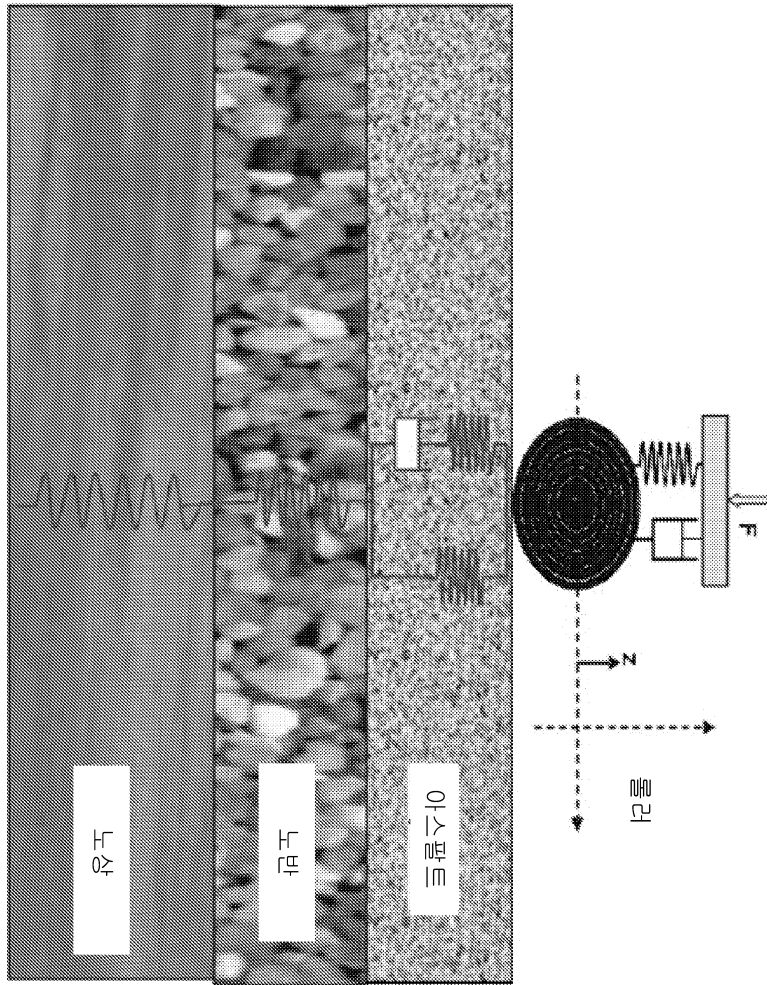
도면1



도면2

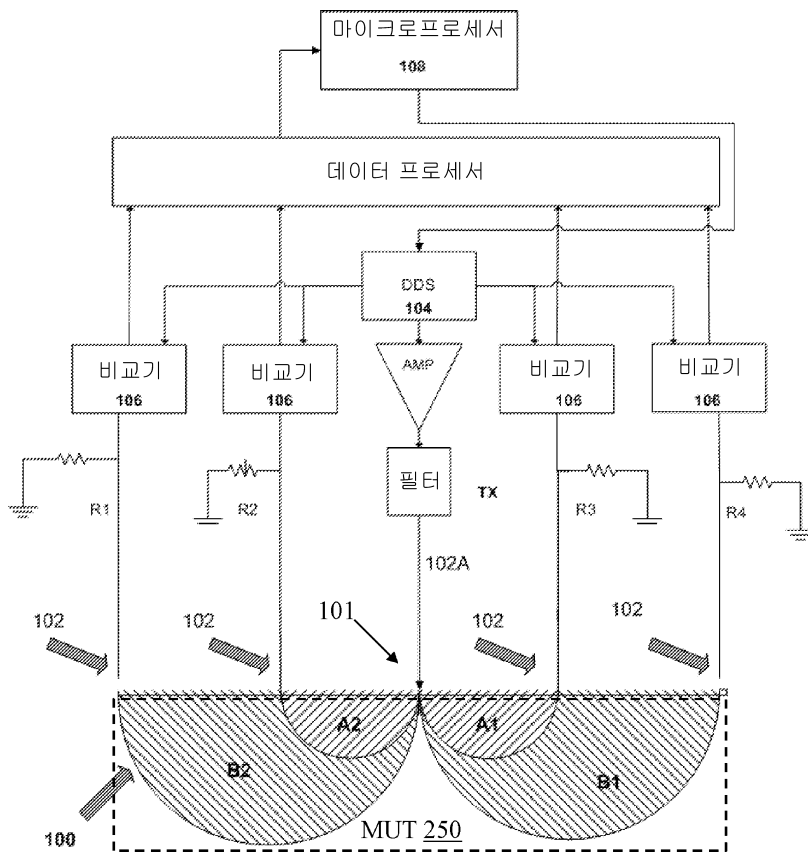


도면3

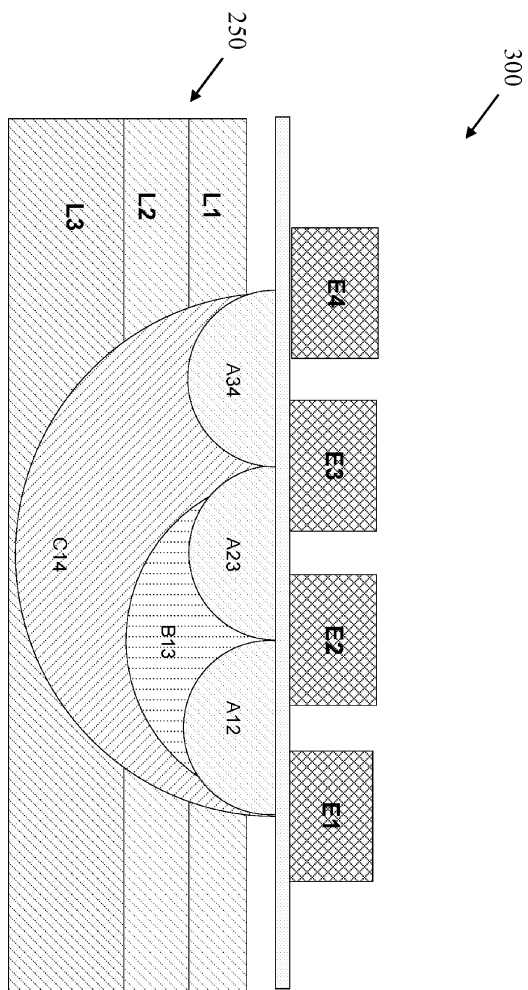




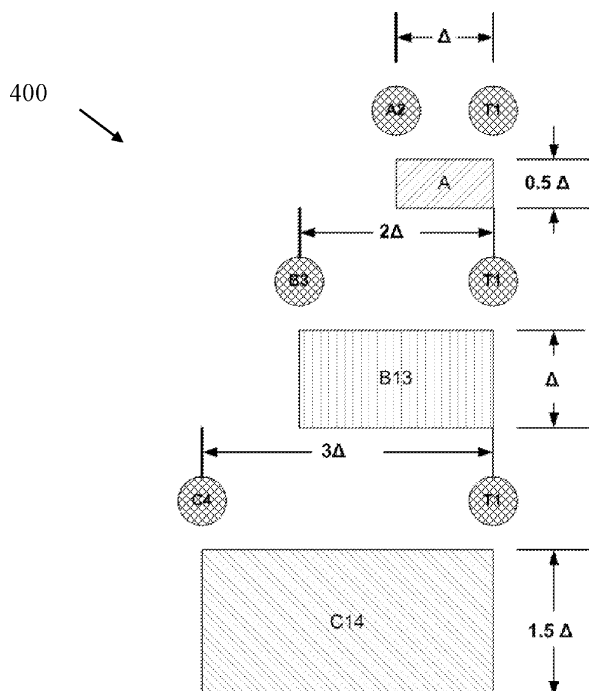
도면4



도면5

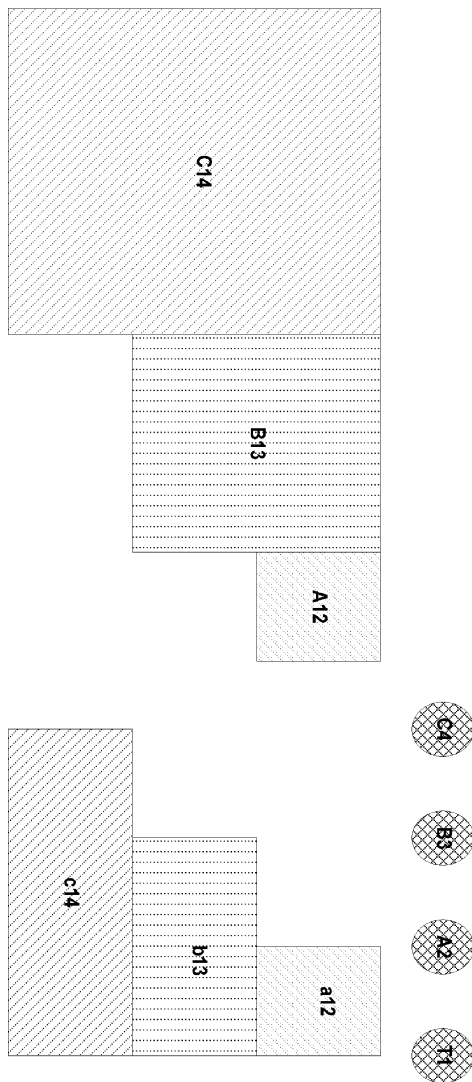


도면6

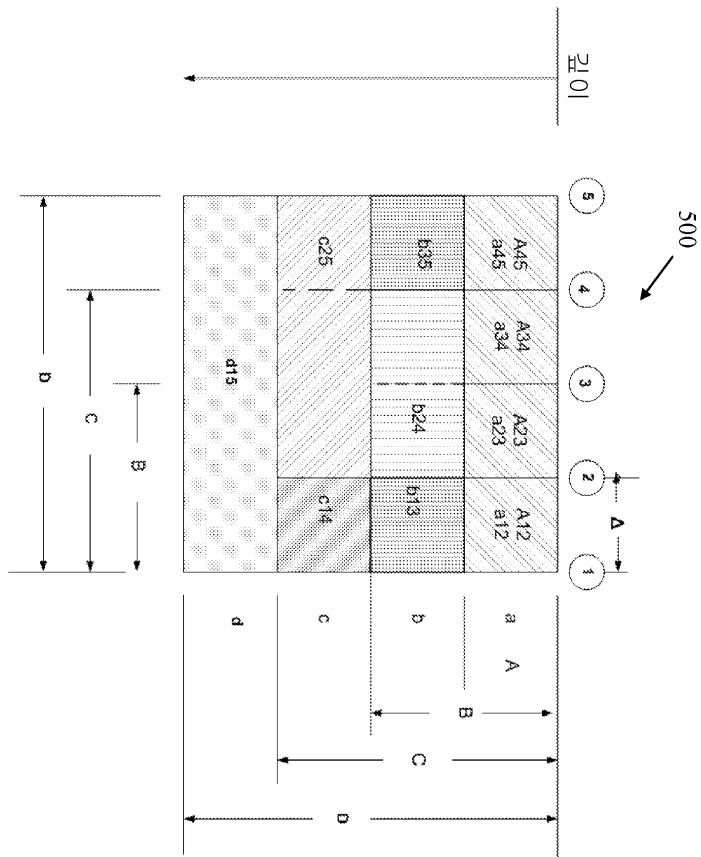


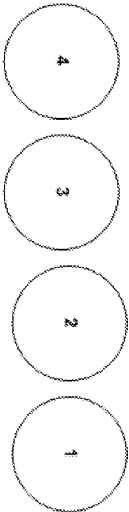


도면7



도면8





$a = a_{xx}$ 의 직렬 결합 $a_{xx} = A_{xx}$ 결합
$B_{xx} = a$ 와 $b$ 의 병렬 결합 $b = b_{xx}$ 의 직렬 결합
$C = a, b$ 및 $c$ 의 병렬 결합 $c = c_{xx}$ 의 직렬 결합

a34	a23	a13
b24	b13	
c14		

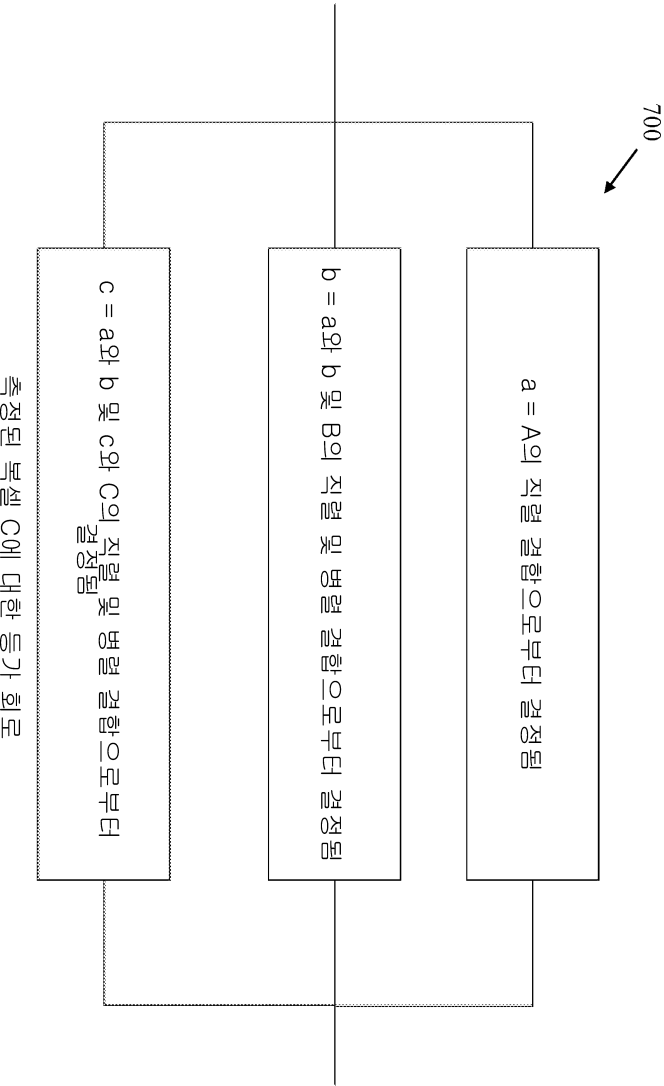
서브-복셀 레이어 a

서브-복셀 레이어 b

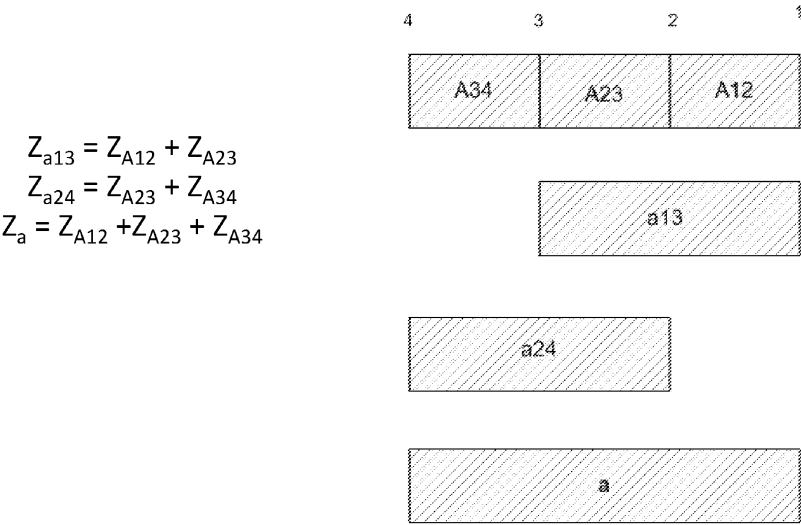
서브-복셀 레이어 c

도면9

도면10

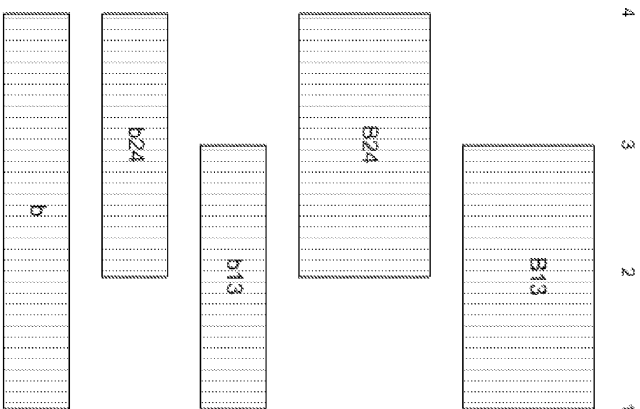


도면11

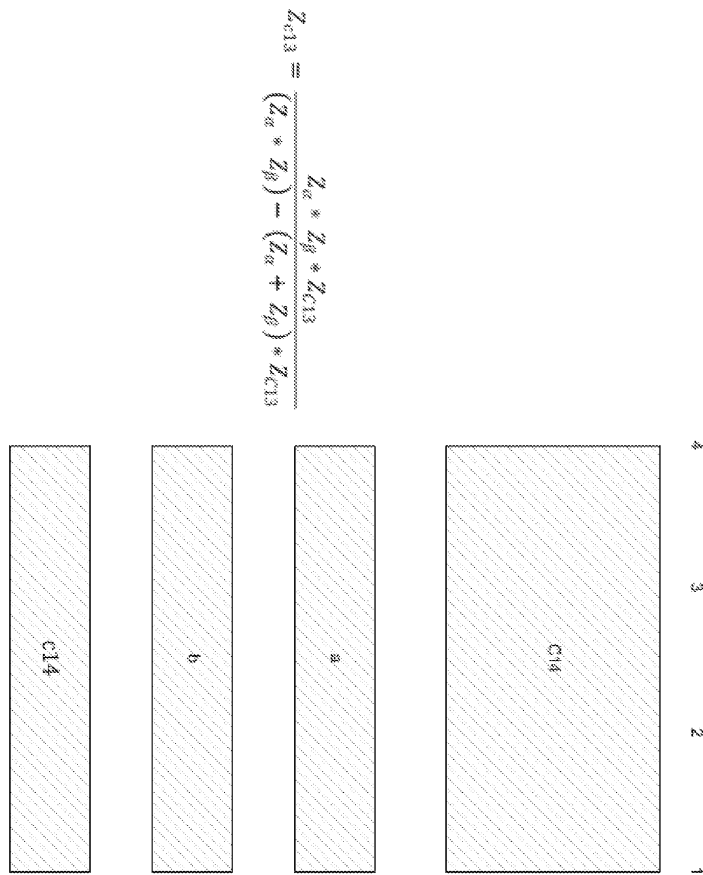


도면12

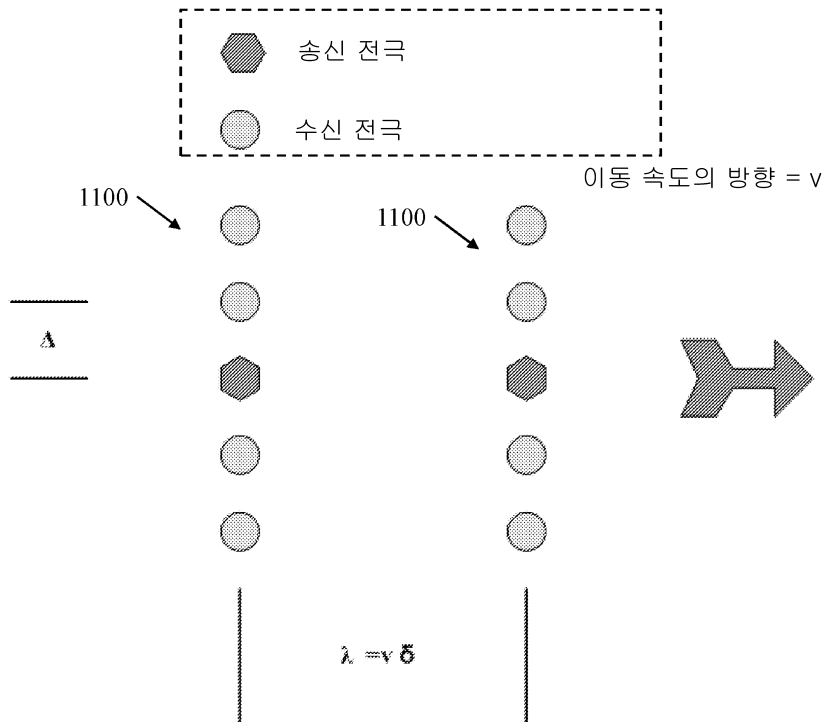
$$\begin{aligned} Z_{b13} &= \frac{(Z_{A23} + Z_{A12}) * Z_{B13}}{(Z_{A23} + Z_{A12}) - Z_{B13}} \\ Z_{b24} &= \frac{(Z_{A34} + Z_{A23}) * Z_{B24}}{(Z_{A34} + Z_{A23}) - Z_{B24}} \end{aligned}$$



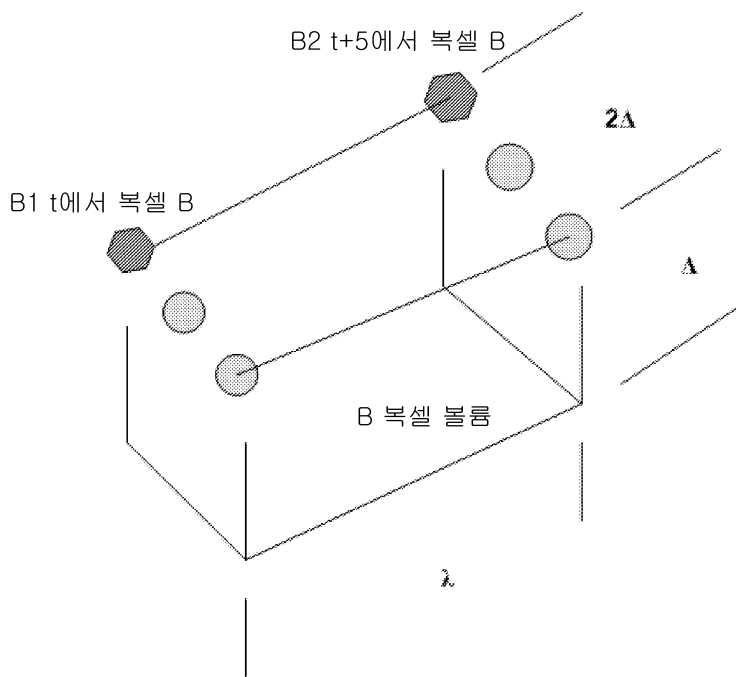
도면13



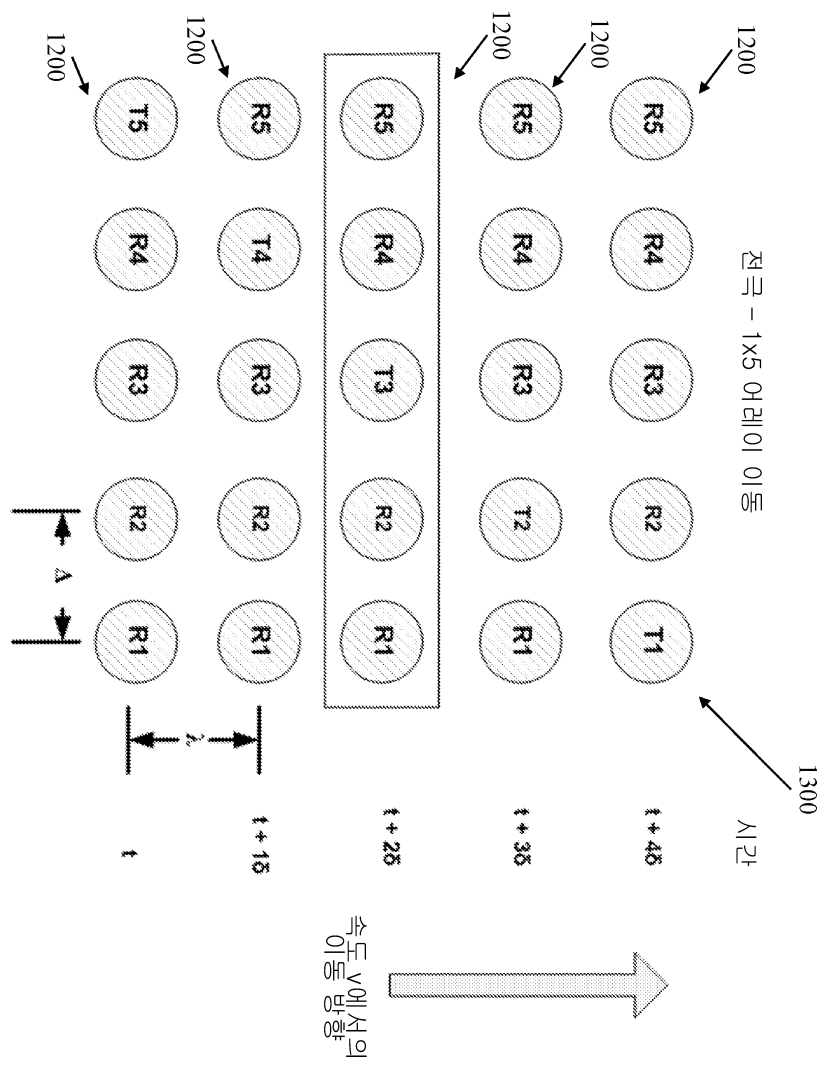
도면14



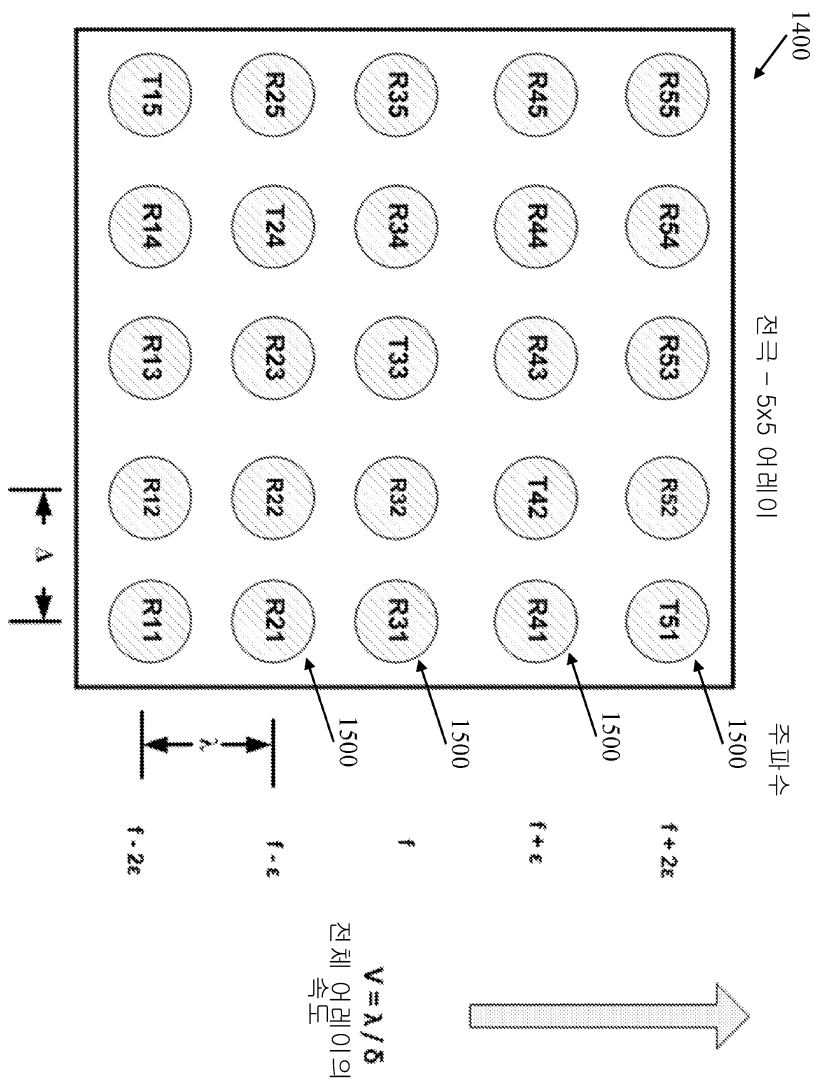
도면15



도면16

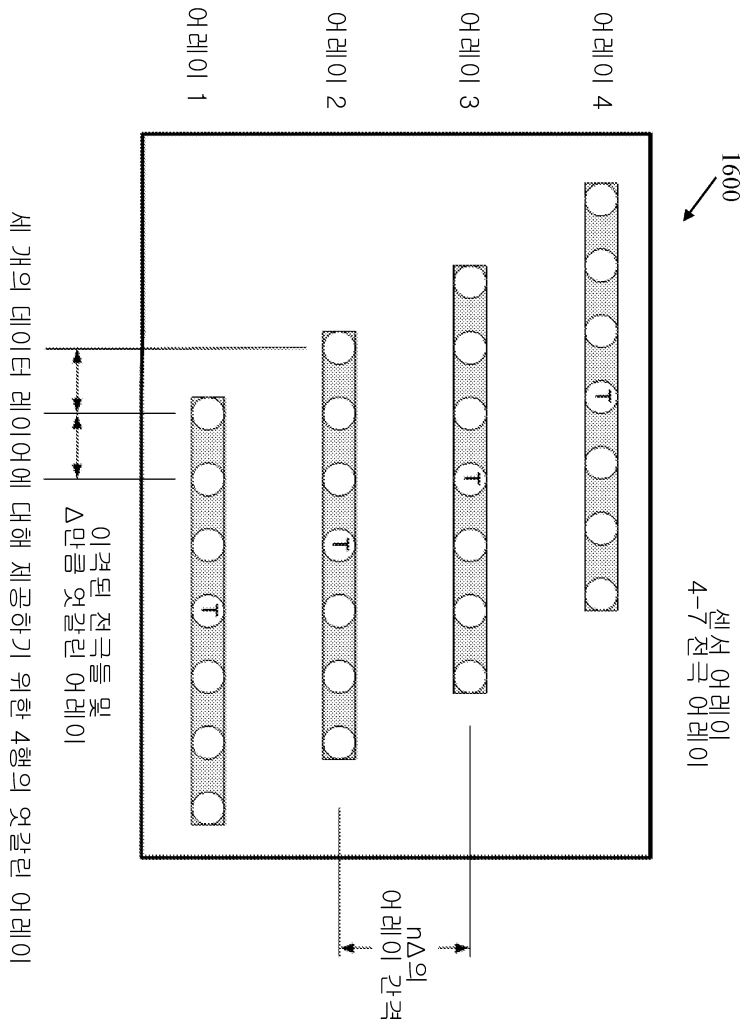


도면17

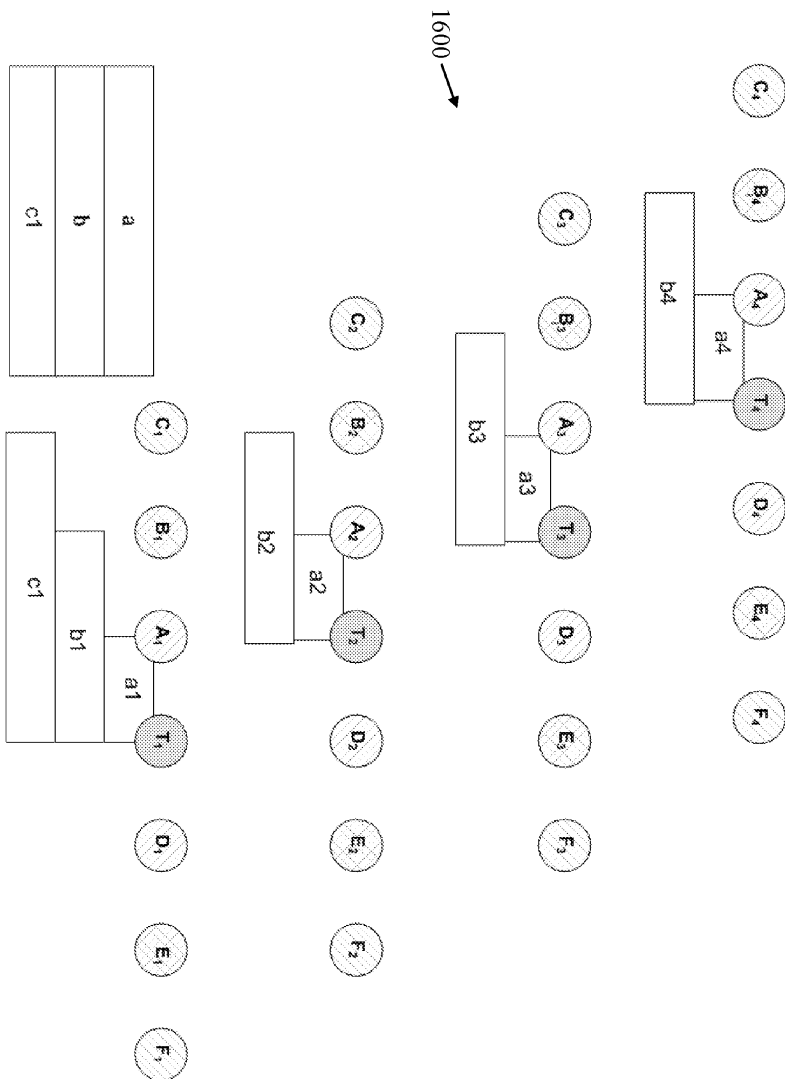




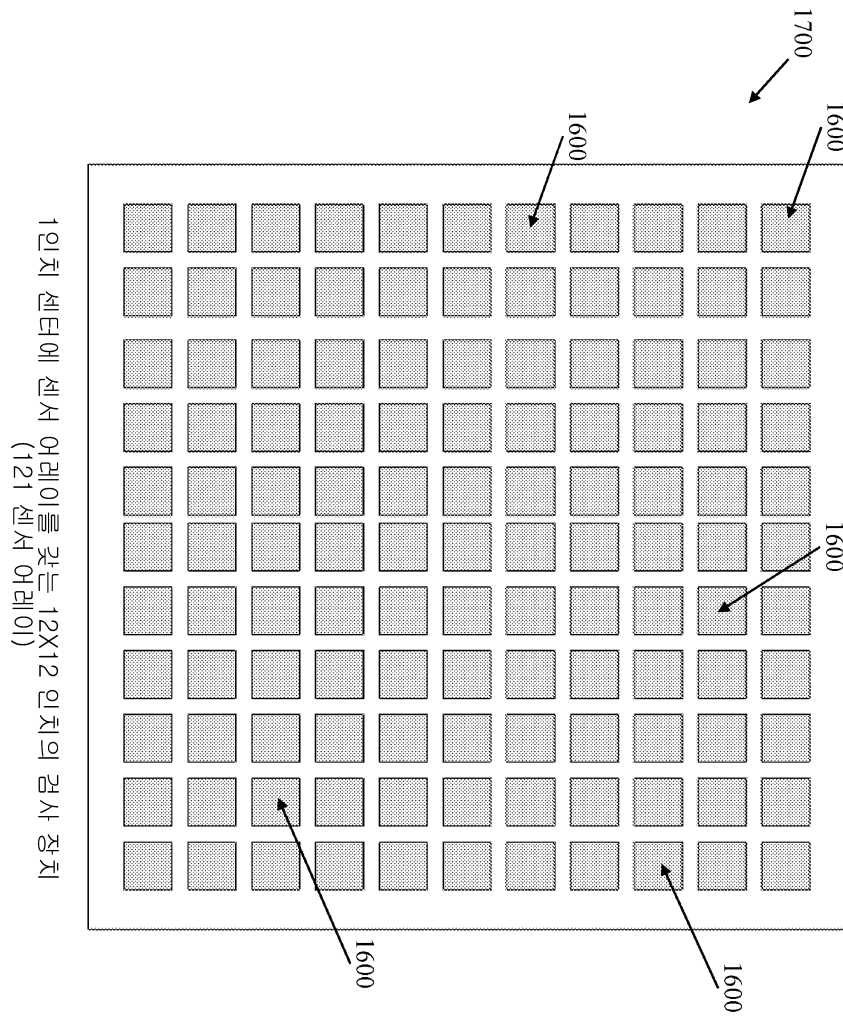
도면18



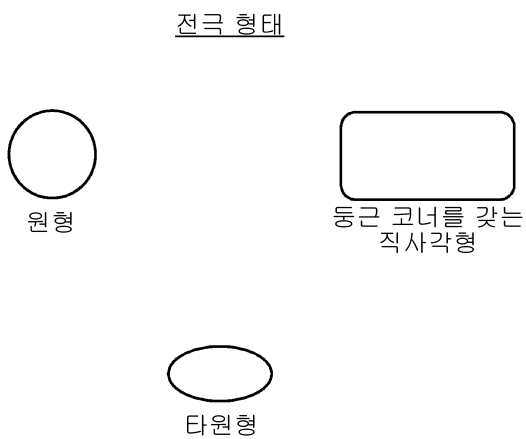
도면19



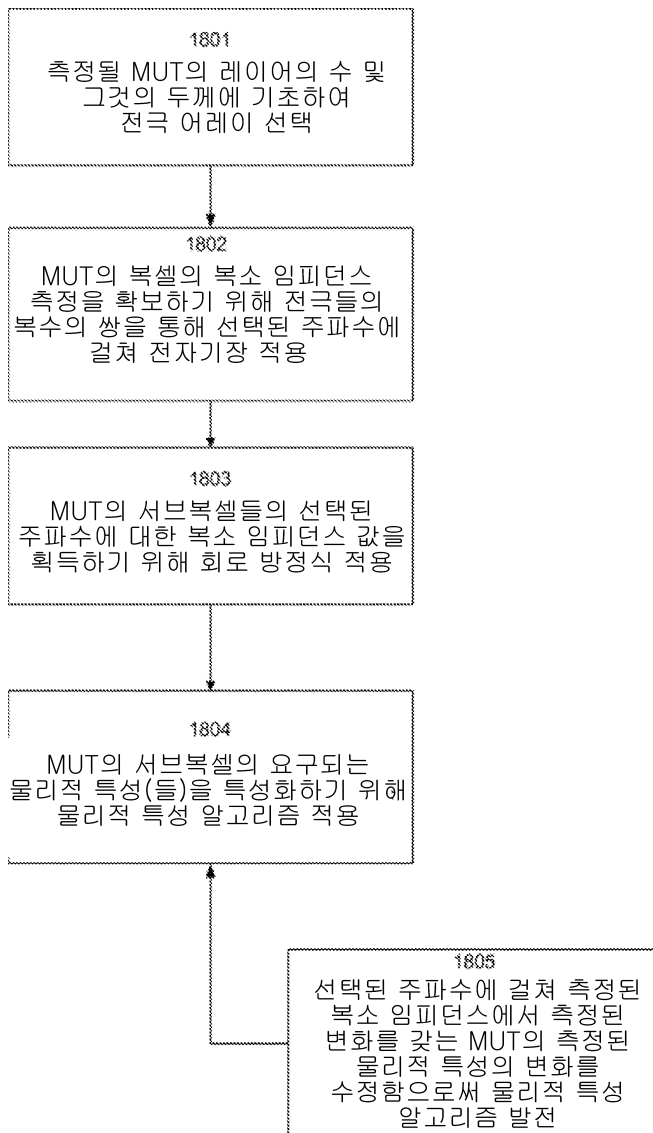
도면20



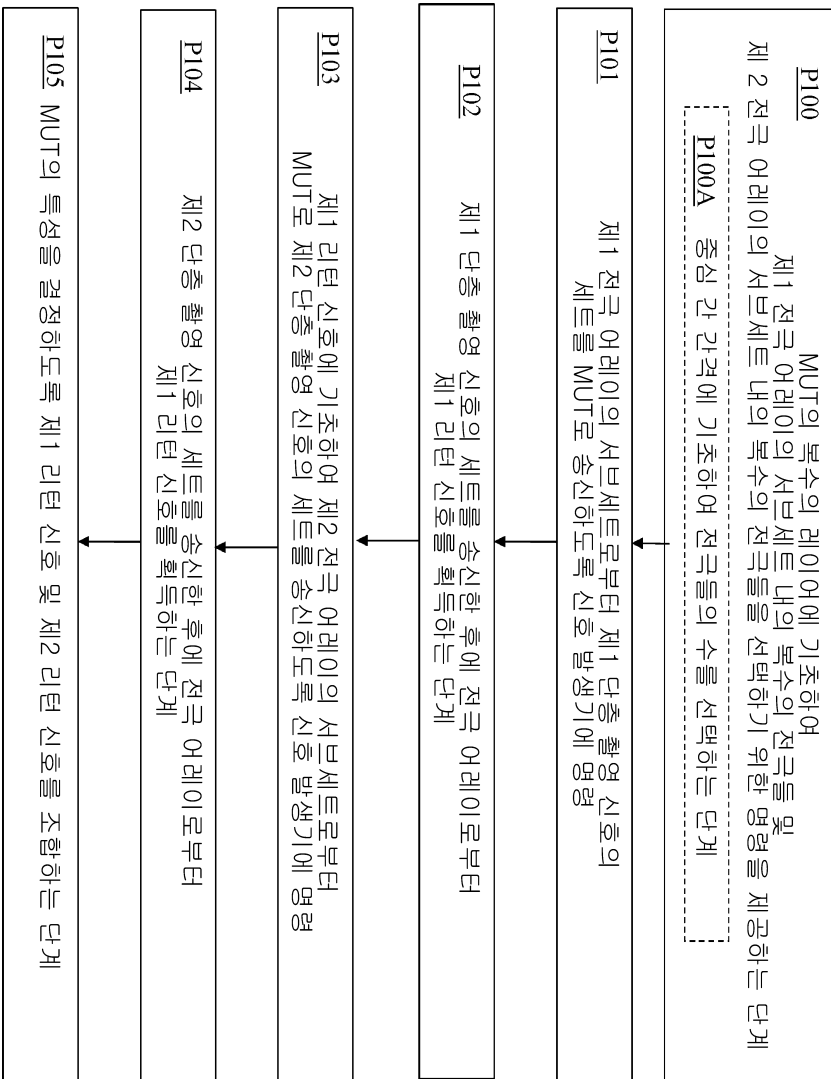
도면21



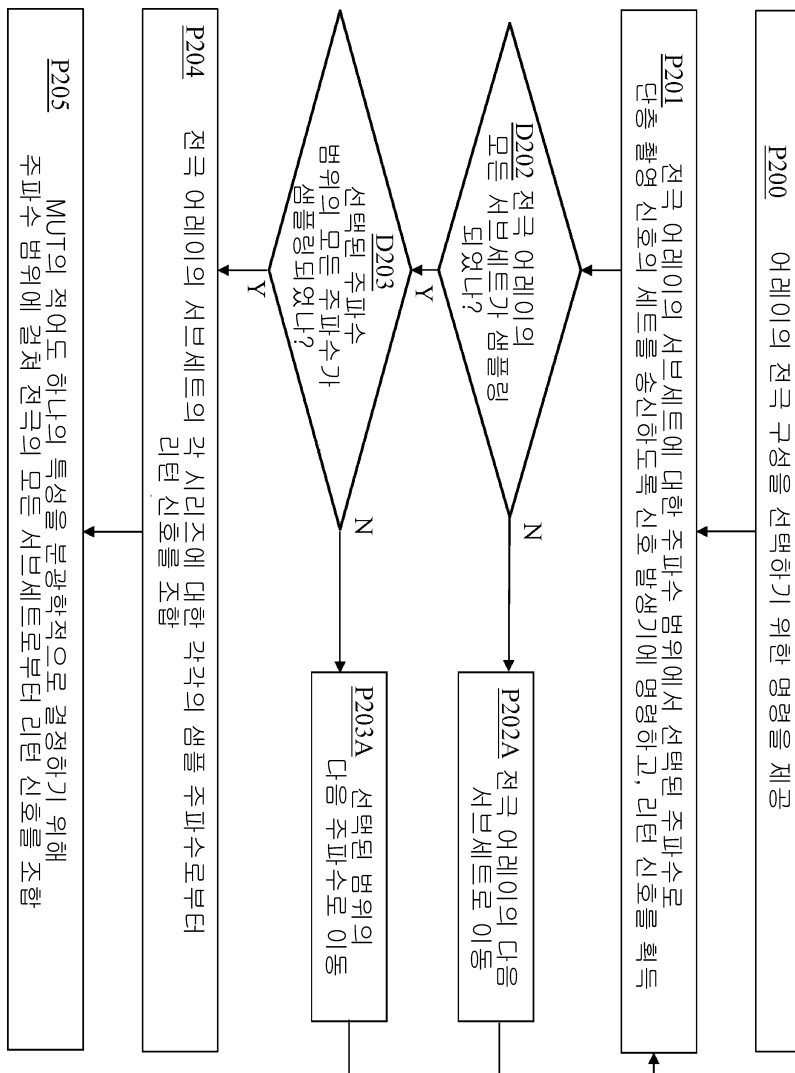
도면22



도면23

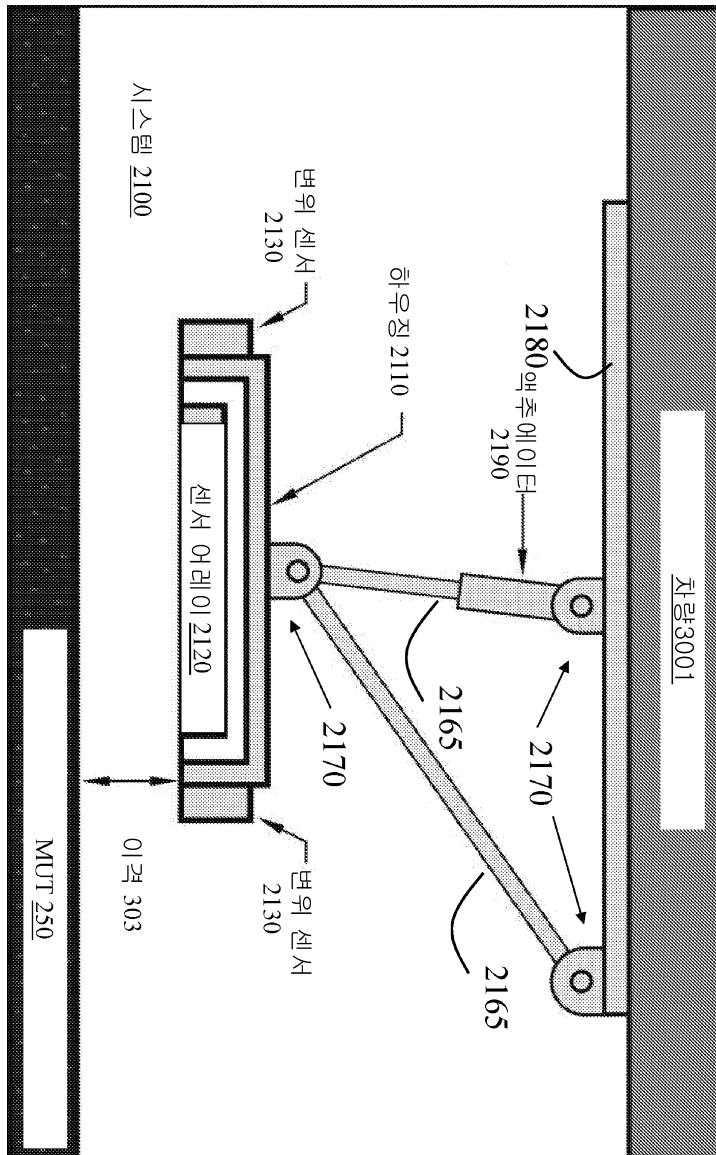


도면24

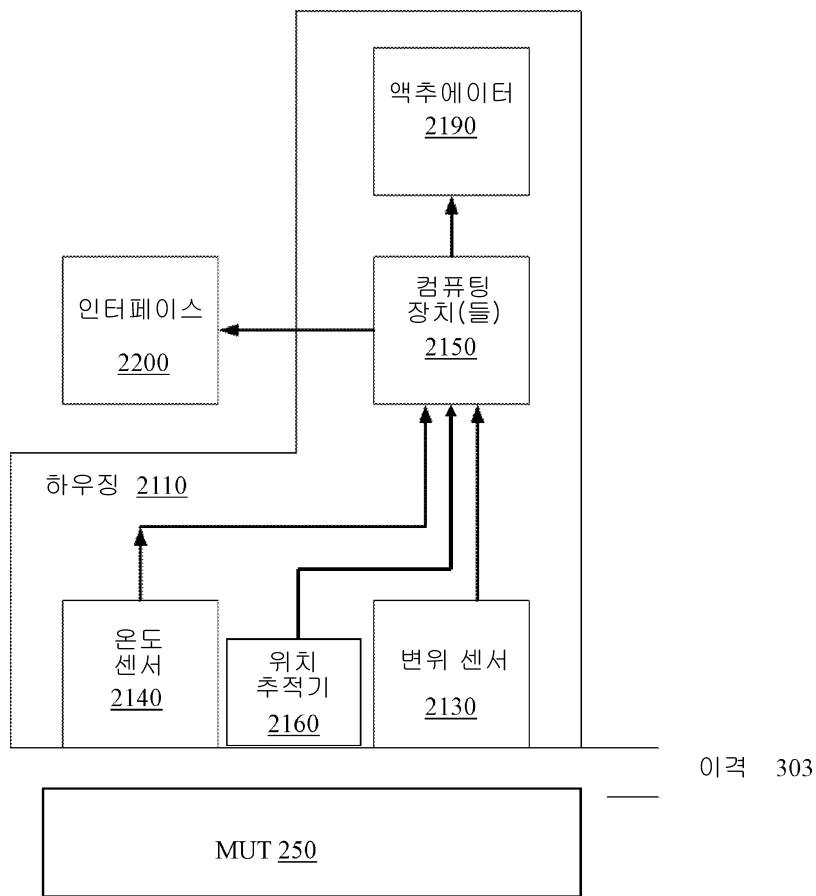




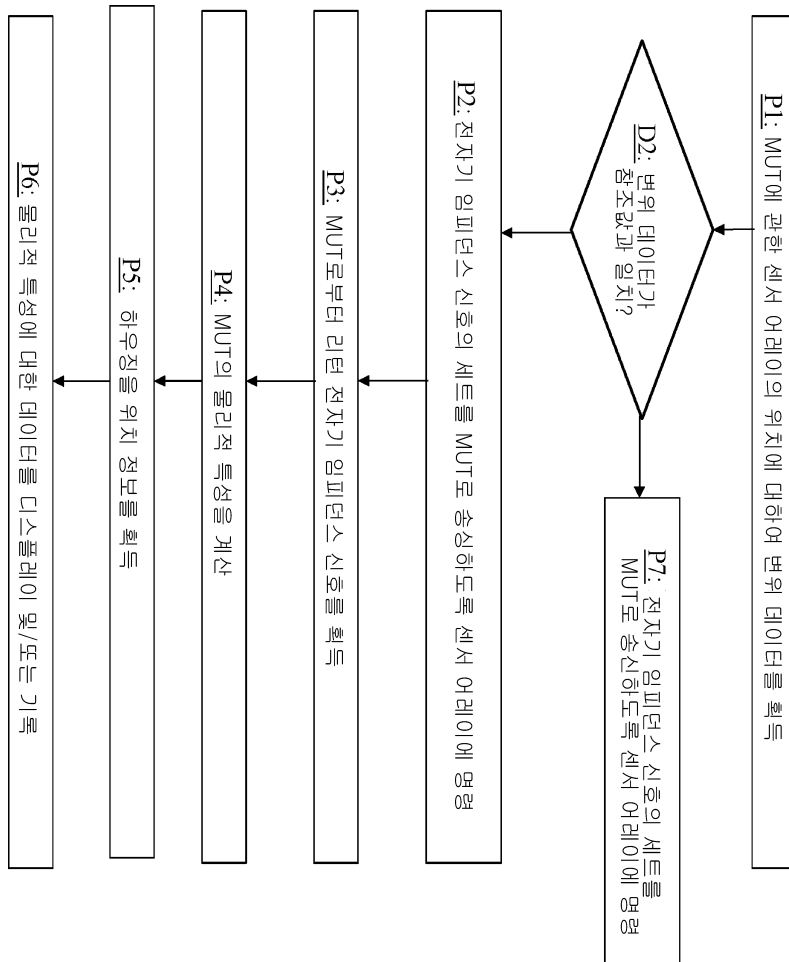
도면25



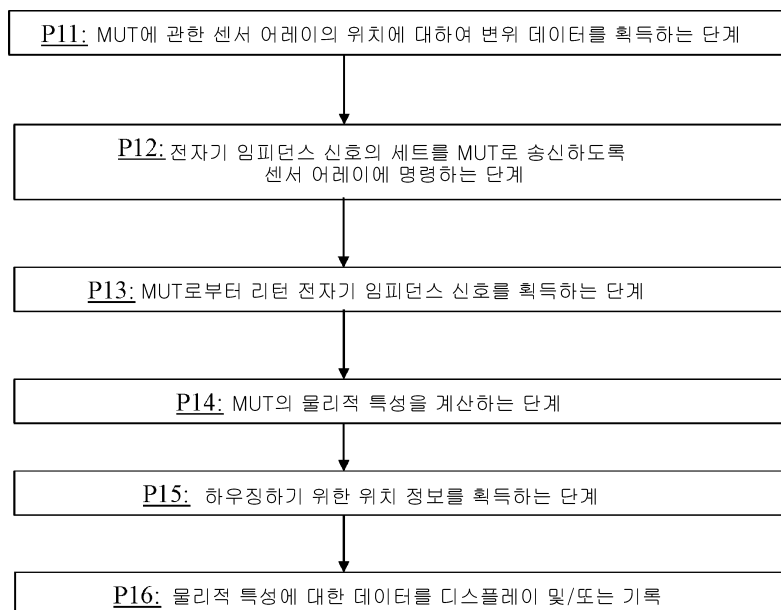
도면26



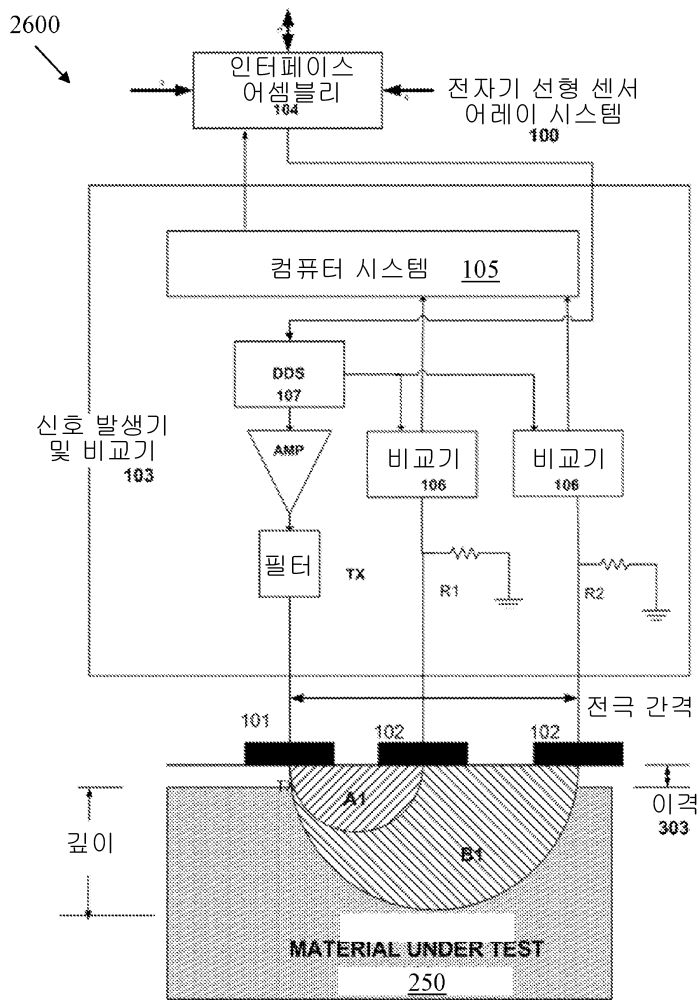
도면27



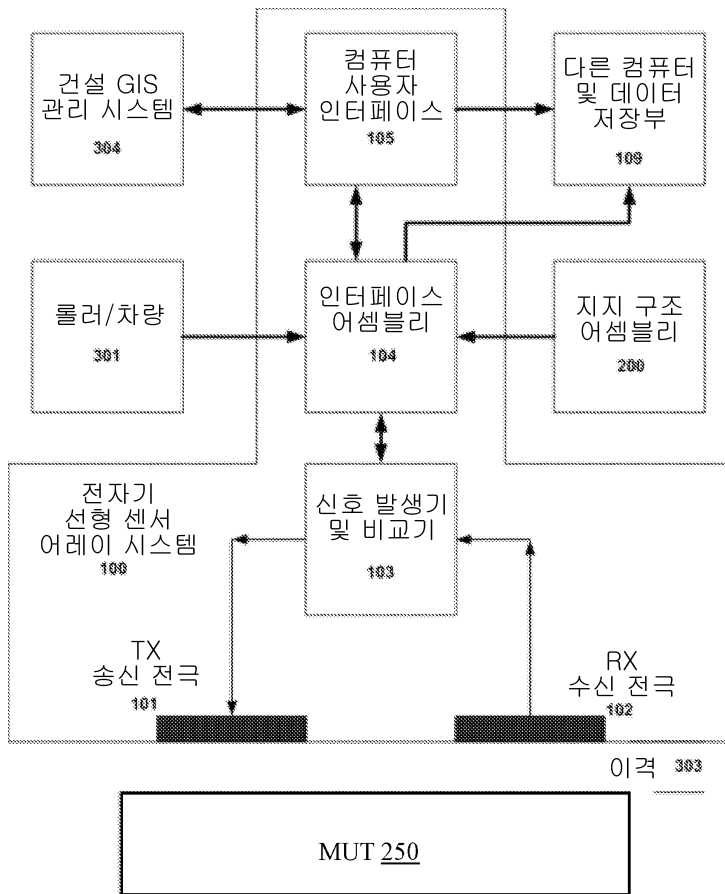
도면28



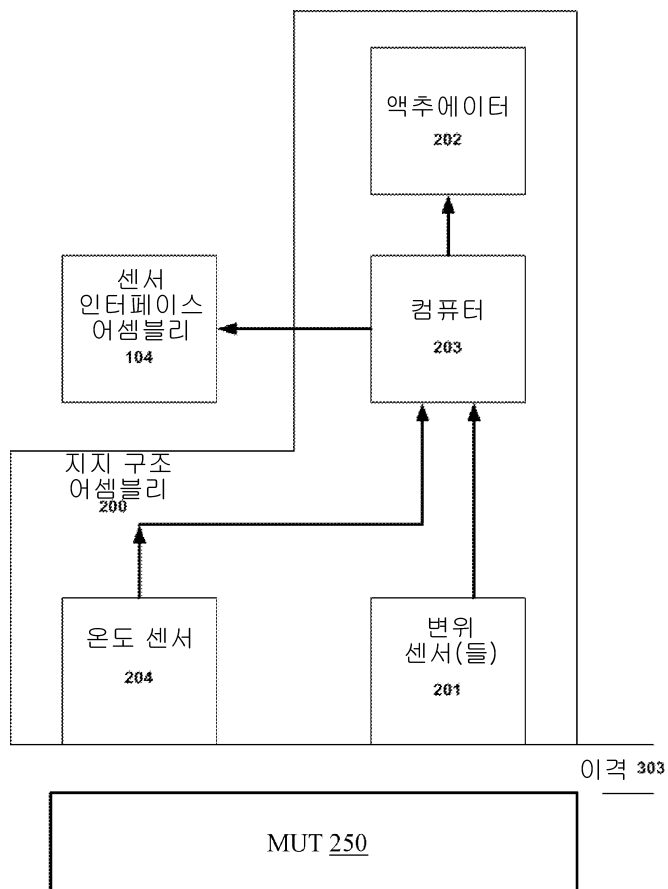
도면29



도면30

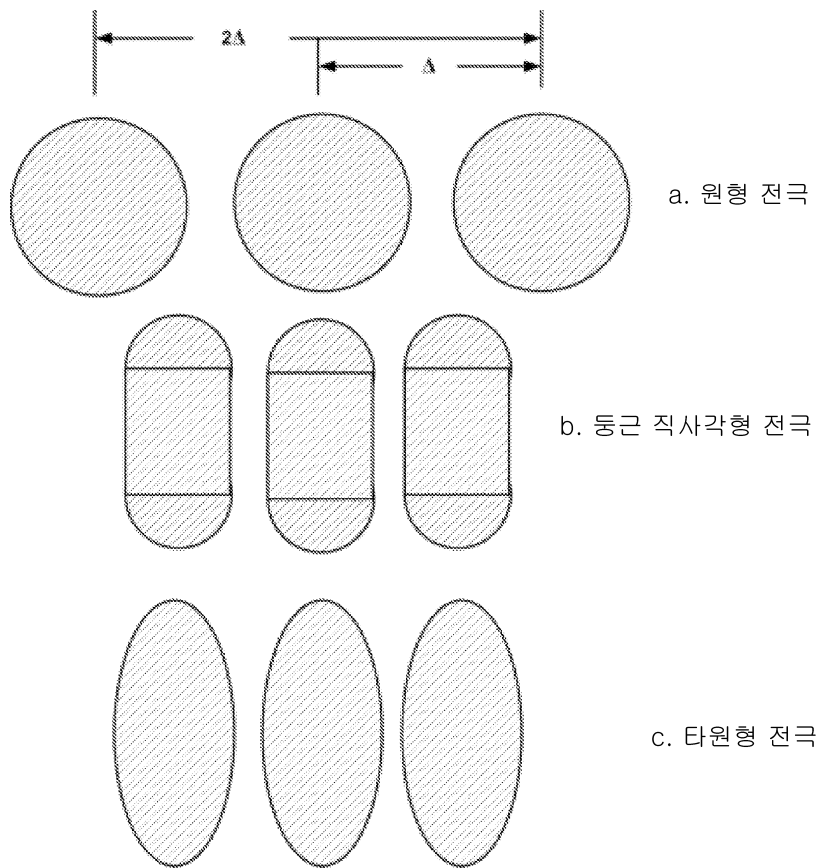


도면31

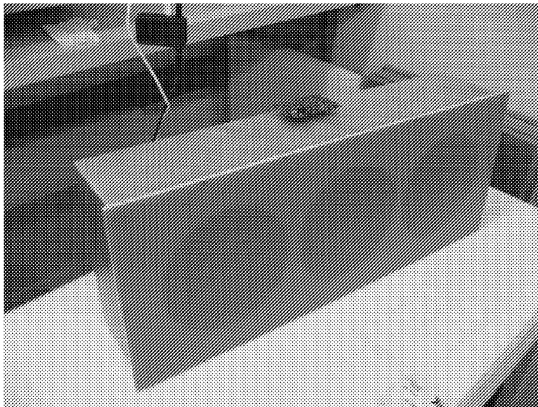




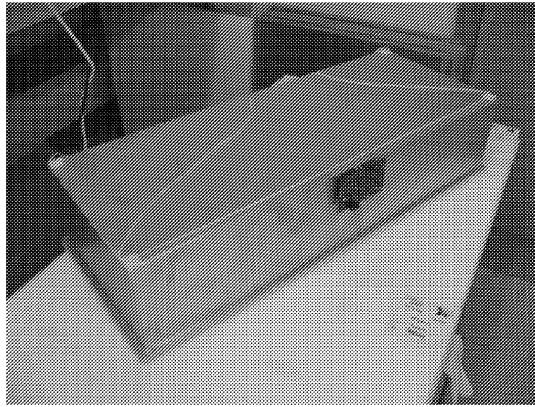
도면32



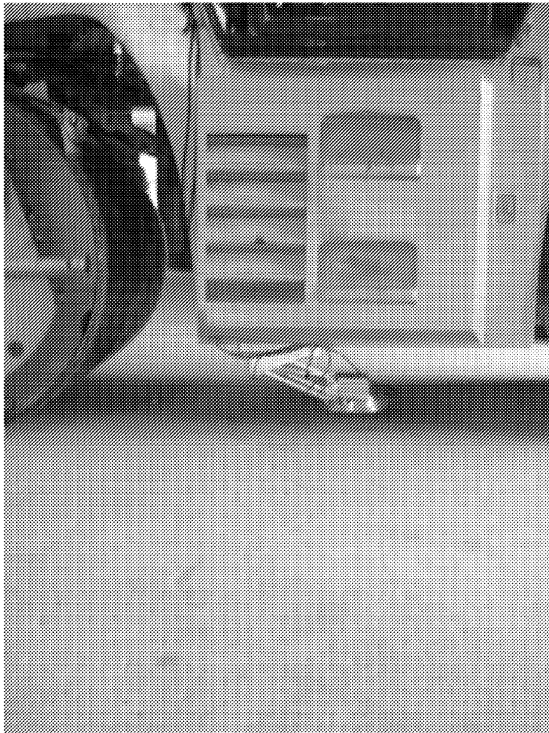
도면33a



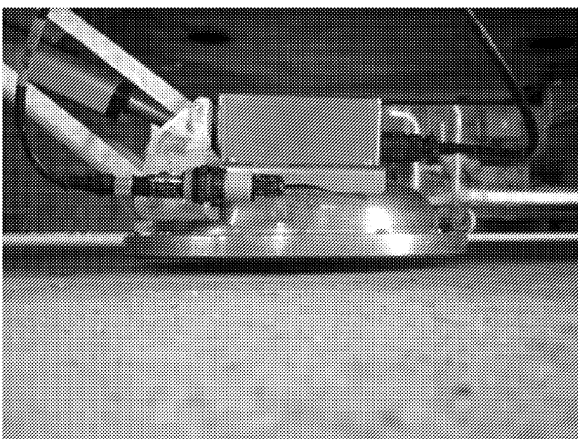
도면33b



도면34a



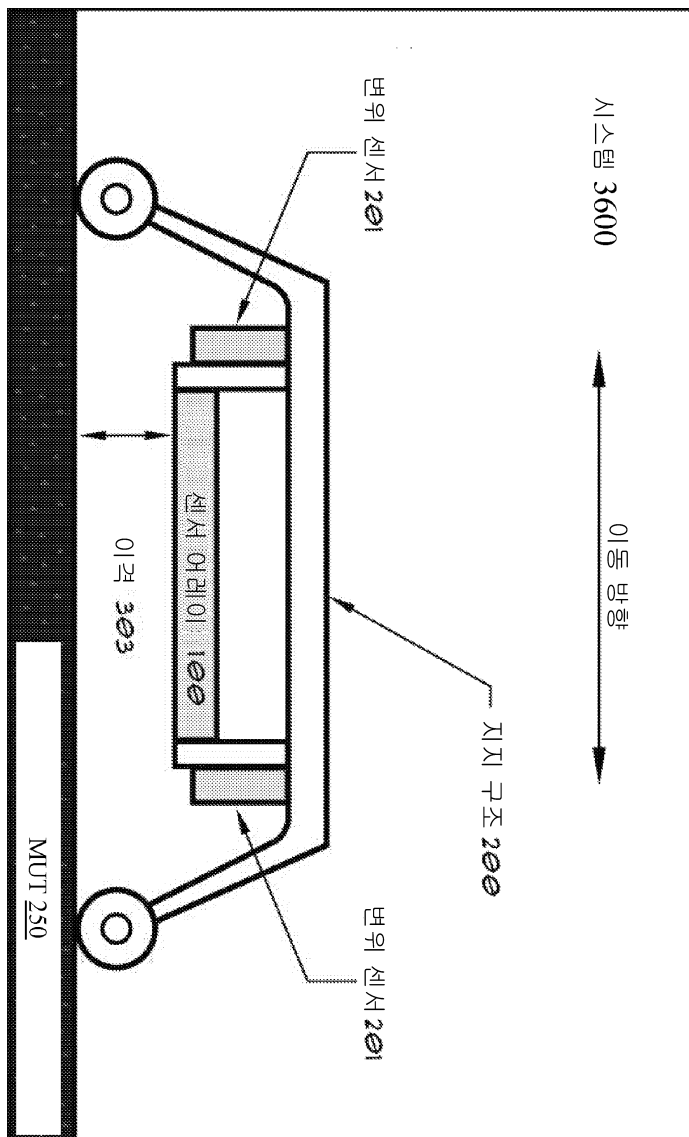
도면34b



도면35

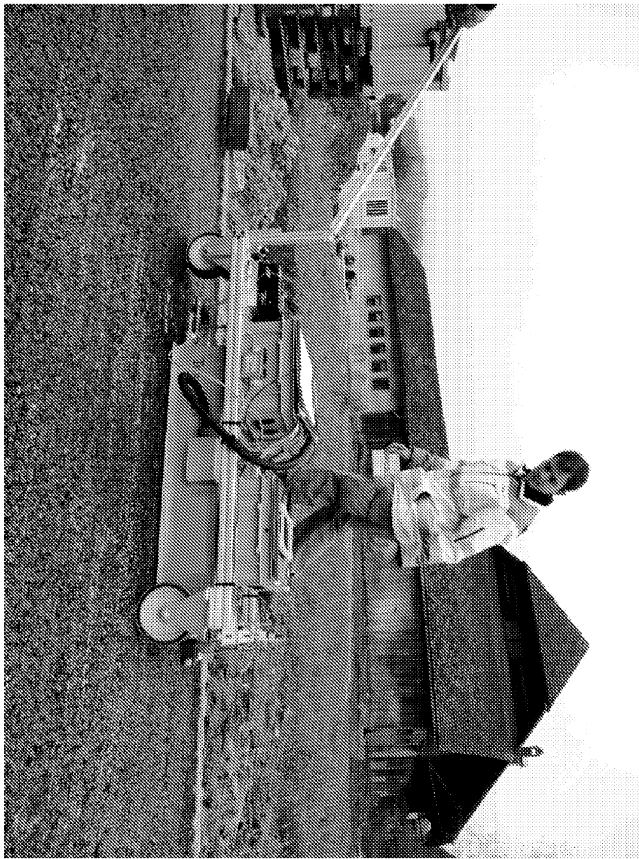


도면36

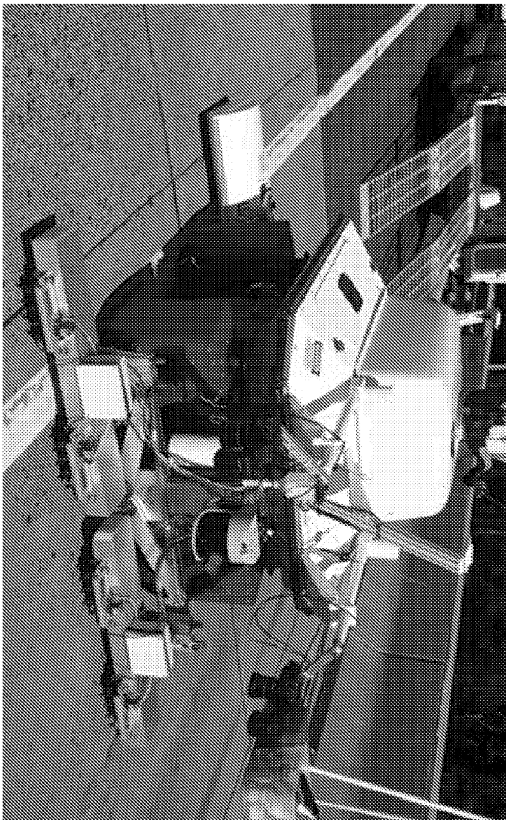




도면37



도면38



도면39

