



등록특허 10-2746348



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2024년12월23일
(11) 등록번호 10-2746348
(24) 등록일자 2024년12월19일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01N 29/24 (2006.01) *G01N 29/34* (2006.01)
G01N 29/36 (2006.01)
- (52) CPC특허분류
G01N 29/2418 (2013.01)
G01N 29/348 (2013.01)
- (21) 출원번호 10-2016-0174817
- (22) 출원일자 2016년12월20일
심사청구일자 2021년12월20일
- (65) 공개번호 10-2017-0074798
- (43) 공개일자 2017년06월30일
- (30) 우선권주장
62/270,529 2015년12월21일 미국(US)
15/070,261 2016년03월15일 미국(US)
- (56) 선행기술조사문헌
US05010885 A*
US20130088724 A1*

*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

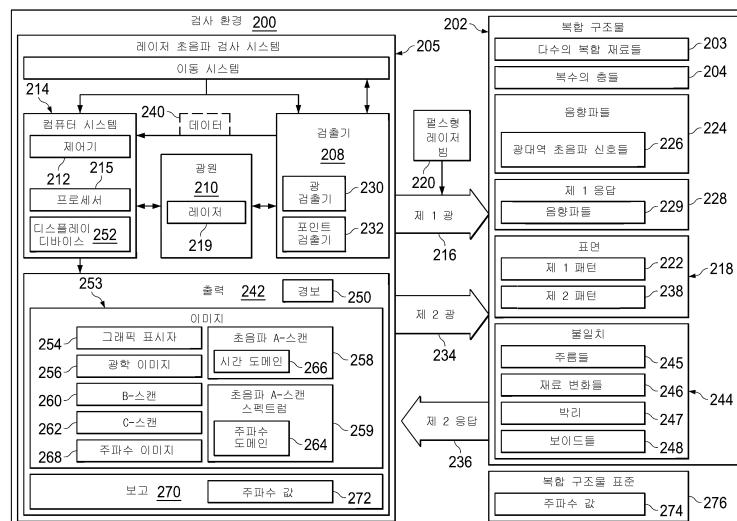
전체 청구항 수 : 총 12 항

심사관 : 김민석

(54) 발명의 명칭 복합 검사

(57) 요약

복합 구조물에서 재료 변화들을 검출하는 방법이 제시된다. 펠스형 레이저 빔이 다수의 복합 재료들로 구성된 복합 구조물 쪽으로 향하게 된다. 복합 구조물에 의해 펠스형 레이저 빔의 방사선이 흡수될 때 복합 구조물에서 광대역 초음파 신호들이 형성된다. 데이터를 형성하도록 광대역 초음파 신호들이 검출된다. 데이터는 다수의 초음파 A-스캔들을 포함한다. 다수의 초음파 A-스캔들 각각에 대한 복수의 주파수 측정들을 식별하도록 데이터가 처리된다. 복수의 주파수 측정들을 사용하여 주파수 이미지가 디스플레이된다. 재료 변화들은 주파수 이미지로 표현된다.

대 표 도 - 도2

(52) CPC특허분류

GO1N 29/36 (2013.01)

(72) 발명자

브래디, 스티븐 케네스

미국 일리노이스 60606 시카고 100 노스 리버사이드 플라자

조지슨, 개리 어네스트

미국 일리노이스 60606 시카고 100 노스 리버사이드 플라자

콜가드, 제프리 레이너

미국 일리노이스 60606 시카고 100 노스 리버사이드 플라자

모트저, 윌리엄 피.

미국 일리노이스 60606 시카고 100 노스 리버사이드 플라자

고든, 클라렌스 라버 3세

미국 일리노이스 60606 시카고 100 노스 리버사이드 플라자

빙함, 질 파이슬레이

미국 일리노이스 60606 시카고 100 노스 리버사이드 플라자

스튜어트, 알렌 애프.

미국 일리노이스 60606 시카고 100 노스 리버사이드 플라자

케네디, 제임스 씨.

미국 일리노이스 60606 시카고 100 노스 리버사이드 플라자

명세서

청구범위

청구항 1

복합 구조물(202)에서 재료 변화들(246)을 검출하는 방법으로서,

펄스형 레이저 빔(220)을 다수의 복합 재료들(203)로 구성된 상기 복합 구조물(202) 쪽으로 향하게 하는 단계
- 상기 복합 구조물(202)에 의해 상기 펄스형 레이저 빔(220)의 방사선이 흡수될 때 상기 복합 구조물(202)에서 광대역 초음파 신호들(226)이 형성됨 -;

데이터(240)를 형성하기 위해 상기 광대역 초음파 신호들(226)을 검출하는 단계 - 상기 데이터(240)는 다수의 초음파 A-스캔(A-scan)들(258, 303)을 포함함 -;

상기 다수의 초음파 A-스캔들(258, 303) 각각에 대한 복수의 주파수 측정들(317)을 식별하도록 상기 데이터(240)를 처리하는 단계 - 상기 데이터(240)를 처리하는 단계는:

상기 다수의 초음파 A-스캔들(258, 303) 각각에 이동 윈도우(312)를 적용하는 단계; 및

상기 이동 윈도우(312) 내에서 평균 주파수(318) 또는 최대 주파수(320) 중 적어도 하나를 결정하는 단계를 포함함 -; 및

상기 복수의 주파수 측정들(317)을 사용하여 주파수 이미지(268, 322)를 디스플레이하는 단계 - 상기 재료 변화들(246)은 상기 주파수 이미지(268, 322)로 표현됨 - 를 포함하고,

상기 최대 주파수(320)를 결정하는 단계는:

식 $S_n = \sum_{k=1}^p a_k * S_{n-k}$ 를 사용하여 상기 다수의 초음파 A-스캔들(258, 303) 중 한 A-스캔의 윈도우형 신호(316)의 최대 주파수(320)를 결정하는 단계를 포함하고 - p는 계수들의 양이고, S_n 은 샘플 포인트 n에서의 A-스캔 신호임 -,

상기 평균 주파수(318)를 결정하는 단계는:

식 $f_{mean} = \frac{1}{2\pi i R(0)} \hat{R}(0) = \frac{1}{2\pi} \dot{\phi}(0)$ - $R(0)$ 은 0 시점에서의 복소 자기 상관 함수 $\hat{R}(t)$ 의 크기이고, $\phi(0)$

은 0 시점에서의 상기 복소 자기 상관 함수의 위상이며, 함수 위의 점은 해당 함수의 시간 미분을 나타냄 - 또

$$f_{mean} = \tan^{-1} \frac{im R_N(1)}{re R_N(1)}$$

는 A-스캔의 N-포인트 샘플링된 버전의 경우, 식 - $R_N(1)$ 은 샘플 포인트 1에서 평가된 N-포인트 복소 자기 상관 함수 R_N 이며, im은 상기 복소 자기 상관 함수의 허수부를 의미하고, re는 상기 복소 자기 상관 함수의 실수부를 의미함 - 중 적어도 하나에 따라 상기 다수의 초음파 A-스캔들(258, 303) 중 한 초음파 A-스캔의 윈도우형 신호(316)의 복소 분석 표현의 자기 상관 함수 $\hat{R}(t)$ 를 사용하여 상기 초음파 A-스캔의 윈도우형 신호(316)의 평균 주파수(318)를 결정하는 단계를 포함하는,

복합 구조물(202)에서 재료 변화들(246)을 검출하는 방법.

청구항 2

삭제

청구항 3

제 1 항에 있어서,

상기 이동 윈도우(312)는 가우스 형상을 갖는,

복합 구조물(202)에서 재료 변화들(246)을 검출하는 방법.

청구항 4

제 1 항 또는 제 3 항에 있어서,

상기 주파수 이미지(268, 322)를 분석함으로써 상기 복합 구조물(202)에 바람직하지 않은 상태들이 존재하는지 여부를 결정하는 단계를 더 포함하며,

상기 바람직하지 않은 상태들은 상기 재료 변화들(246)을 포함하는,

복합 구조물(202)에서 재료 변화들(246)을 검출하는 방법.

청구항 5

제 1 항 또는 제 3 항에 있어서,

상기 복수의 주파수 측정들(317)은 평균 주파수들(318) 또는 최대 주파수들(320) 중 적어도 하나로부터 선택되는,

복합 구조물(202)에서 재료 변화들(246)을 검출하는 방법.

청구항 6

삭제

청구항 7

삭제

청구항 8

제 1 항 또는 제 3 항에 있어서,

상기 광대역 초음파 신호들(226)은 포인트형 광 검출기(230)를 사용하여 검출되는,

복합 구조물(202)에서 재료 변화들(246)을 검출하는 방법.

청구항 9

복합 구조물(202)에 대한 비파괴 검사를 수행하기 위한 방법으로서,

펄스형 레이저 빔(220)을 복수의 층들(204)로 구성된 상기 복합 구조물(202) 쪽으로 향하게 하는 단계 – 상기 복합 구조물(202)에 의해 상기 펄스형 레이저 빔(220)의 방사선이 흡수될 때 상기 복합 구조물(202)에서 다수의 광대역 초음파 신호들(226)이 형성됨 –;

데이터(240)를 형성하기 위해 상기 광대역 초음파 신호들(226)을 검출하는 단계 – 상기 데이터(240)는 상기 복합 구조물(202)에 대한 복수의 초음파 A-스캔들(258, 303)을 포함함 –;

윈도우형(windowed) 신호들(316)을 형성하도록 상기 복수의 초음파 A-스캔들(258, 303) 각각에 이동 윈도우(312)를 적용하는 단계;

상기 복수의 초음파 A-스캔들(258, 303) 각각에 대한 상기 윈도우형 신호들(316) 내에서 주파수 측정(317)을 결정하는 단계;

상기 주파수 측정(317)을 사용하여 상기 복수의 초음파 A-스캔들(258, 303) 각각의 A-스캔 스펙트럼(259)으로부터 구조 신호(305)의 스펙트럼 성분들(326)을 제거하는 단계; 및

보간된 A-스캔 스펙트럼 데이터를 형성하기 위해, 상기 구조 신호(305)의 스펙트럼 성분들(326)을 제거한 후 상기 복수의 초음파 A-스캔들(258, 303) 각각의 A-스캔 스펙트럼(259)에 대해 보간을 수행하는 단계를 포함하는,

방법.

청구항 10

제 9 항에 있어서,

상기 복수의 초음파 A-스캔들(258, 303) 각각의 A-스캔 스펙트럼(259)을 형성하도록 상기 복수의 초음파 A-스캔들(258, 303) 각각을 푸리에 변환하는 단계; 및

복수의 무구조(structureless) 초음파 A-스캔들(306)을 형성하도록 상기 보간된 A-스캔 스펙트럼 데이터에 대해 푸리에 역변환을 수행하는 단계를 더 포함하는,

방법.

청구항 11

제 10 항에 있어서,

상기 복수의 무구조 초음파 A-스캔들로부터 형성된 무구조 B-스캔 이미지(330)를 필터링하는 단계를 더 포함하는,

방법.

청구항 12

제 11 항에 있어서,

상기 무구조 B-스캔 이미지를 필터링하는 단계는 상기 무구조 B-스캔 이미지에 대해 저역 통과 필터(308)를 사용하는 단계를 포함하는,

방법.

청구항 13

제 9 항에 있어서,

상기 주파수 측정(317)은 평균 주파수(318) 또는 최대 주파수(320)로부터 선택되는,

방법.

청구항 14

제 13 항에 있어서,

상기 평균 주파수(318)는 식 $f_{mean} = \frac{1}{2\pi i R(0)} = \frac{1}{2\pi} \dot{\phi}(0)$ — $R(0)$ 은 0 시점에서의 복소 자기 상관 함수 \hat{R} (t)의 크기이고, $\dot{\phi}(0)$ 은 0 시점에서의 상기 복소 자기 상관 함수의 위상이며, 함수 위의 점은 해당 함수의 시간 미분

을 나타냄 — 또는 A-스캔의 N-포인트 샘플링된 베전의 경우, 식 $f_{mean} = \tan^{-1} \left[\frac{im R_N(1)}{re R_N(1)} \right]$ — $R_N(1)$ 은 샘플 포인트 1에서 평가된 N-포인트 복소 자기 상관 함수 R_N 이며, im은 복소 자기 상관 함수의 헤수부를 의미하고, re는 복소 자기 상관 함수의 실수부를 의미함 — 중 적어도 하나에 따라 초음파 A-스캔의 원도우형 신호(316)의

복소 분석 표현의 자기 상관 함수 \hat{R} (t)를 사용하여 결정되는,

방법.

청구항 15

제 13 항 또는 제 14 항에 있어서,

상기 최대 주파수(320)는 식 $S_n = \sum_{k=1}^p a_k * S_{n-k}$ 를 사용하여 결정되며,

p는 계수들의 양이고, S_n 은 샘플 포인트 n에서의 A-스캔 신호인,

방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 개시는 일반적으로 비파괴 검사에 관한 것으로, 특히 적층 구조물에 대한 비파괴 검사의 수행에 관한 것이다. 또 보다 구체적으로, 본 개시는 복합 구조물에서 재료 변화들 또는 다른 불일치들을 검출하기 위한 방법 및 장치에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 항공기, 차량들 및 다른 구조물들의 제조시, 이러한 구조물들을 형성하는데 사용되는 부품들의 검사는 흔히 부품들이 부품의 원하는 성능을 위한 원하는 파라미터들을 가질지 여부를 결정하기 위해 수행된다. 추가로, 구조물들 및 부품들은 항공기, 차량들 및 다른 구조물들이 사용 중일 때 정상 유지보수의 일부로서 검사된다.

[0003] 비파괴 시험이 일반적으로 이러한 부품들에 대해 수행된다. 비파괴 시험은 서비스 중에 부품을 사용하는 능력을 변경하지 않고 부품의 특성들을 평가하는 데 사용된다.

[0004] 초음파 시험은 비파괴 시험의 한 타입이다. 초음파 시험은 흔히 복합 재료들을 포함하거나 이들로 구성된 항공기 부품들에 대한 검사들을 수행하는데 사용된다. 초음파 시험은 항공기 부품 또는 구조물과 같은 시험 대상을 관통하여 음파들을 전달하는 것을 수반한다.

[0005] 초음파 시험은 일반적으로 트랜스듀서를 사용하여 수행된다. 트랜스듀서는 음파들을 시험 대상으로 전송하고 음파들에 대한 응답을 검출하도록 구성된다. 이러한 음파들에 대한 응답은 시험 대상에 불일치들이 존재하는지 여부를 결정하도록 분석된다.

[0006] 항공기, 자동차들, 의료 기기들 그리고 심지어는 의류도 점점 더 큰 비율의 복합 재료들로 설계 및 제조되고 있다. 예를 들어, 복합 재료들은 항공기의 중량을 감소시키기 위해 항공기에 사용된다. 이러한 감소된 중량은 탑재 용량 및 연료 효율과 같은 성능 특징들을 향상시킨다. 또한, 복합 재료들은 항공기의 다양한 컴포넌트들에 더 긴 서비스 수명을 제공한다. 복합 재료들은 또한 인공 수족(artificial limb)들, 자전거들, 자동차들, 방탄복 또는 다른 바람직한 제품들과 같은 다른 품목들의 중량을 감소시킬 수 있다.

[0007] 복합 재료들은 2개 또는 그보다 많은 기능 컴포넌트들을 결합함으로써 생성되는 단단한 경량의 재료들일 수 있다. 예를 들어, 복합 재료는 폴리머 수지 매트릭스에 결합된 보강 섬유들을 포함할 수 있다. 복합 재료들에 사용되는 수지들은 열가소성 또는 열경화성 수지들을 포함할 수 있다. 섬유들은 단방향일 수도 있고 또는 직조된 천이나 직물의 형태를 취할 수도 있다.

[0008] 복합 구조물들의 제조시, 복합 재료의 층들은 일반적으로 틀 위에 놓여진다. 층들은 시트들의 섬유들로 구성될 수 있다. 이러한 시트들은 직물들, 테이프, 토우(tow)들 또는 다른 적당한 형태들의 형태를 취할 수 있다. 어떤 경우들에는, 수지가 시트들에 주입되거나 예비 함침(preimpregnate)될 수 있다. 이러한 타입들의 시트들은 일반적으로 프리프레그(prepreg)로 지칭된다. 프리프레그의 서로 다른 층들은 서로 다른 배향들로 놓여질 수 있으며, 제조되는 복합 구조물의 성능 요구들에 따라 서로 다른 수들의 층들이 사용될 수 있다.

[0009] 복합 구조물의 제조 동안 또는 복합 구조물의 사용 중에 복합 구조물에 불일치들이 초래될 수 있다. 복합 재료를 구성하는 층들의 규칙적인 간격으로 인해, 복합 재료의 검사는 일부 위치들 또는 일부 타입들의 불일치들에 대해 요구되는 것보다 더 어려울 수 있다.

[0010] 또한, 일부 불일치들은 종래의 비파괴 기술들을 사용하여 종래와 같이 검출 가능하지 않을 수도 있다. 따라서 앞서 논의한 문제들뿐만 아니라, 다른 가능한 문제들 중 적어도 일부를 고려하는 방법 및 장치를 갖는 것이 바람직할 것이다.

발명의 내용

[0011] 한 예시적인 실시예에서는, 복합 구조물에서 재료 변화들을 검출하는 방법이 제시된다. 펄스형 레이저 빔이 다수의 복합 재료들로 구성된 복합 구조물 쪽으로 향하게 된다. 복합 구조물에 의해 펄스형 레이저 빔의 방사선이 흡수될 때 복합 구조물에서 광대역 초음파 신호들이 형성된다. 데이터를 형성하도록 광대역 초음파 신호들이 검출된다. 데이터는 다수의 초음파 A-스캔(A-scan)들을 포함한다. 다수의 초음파 A-스캔들 각각에 대한 복수의 주파수 측정들을 식별하도록 데이터가 처리된다. 복수의 주파수 측정들을 사용하여 주파수 이미지가 디스

플레이된다. 재료 변화들은 주파수 이미지로 표현된다.

[0012] 다른 예시적인 실시예에서는, 방법이 제시된다. 펠스형 레이저 빔이 복수의 층들로 구성된 복합 구조물 쪽으로 향하게 된다. 복합 구조물에 의해 펠스형 레이저 빔의 방사선이 흡수될 때 복합 구조물에서 다수의 광대역 초음파 신호들이 형성된다. 데이터를 형성하도록 광대역 초음파 신호들이 검출된다. 데이터는 복합 구조물에 대한 복수의 초음파 A-스캔들을 포함한다. 윈도우형(windowed) 신호들을 형성하도록 복수의 초음파 A-스캔들 각각에 이동 윈도우가 적용된다. 복수의 초음파 A-스캔들 각각에 대한 윈도우형 신호들 내에서 주파수 측정이 결정된다. 주파수 측정을 사용하여 복수의 초음파 A-스캔들 각각의 A-스캔 스펙트럼으로부터 구조 신호의 스펙트럼 성분들이 제거된다. 보간된 A-스캔 스펙트럼 데이터를 형성하기 위해, 구조 신호의 스펙트럼 성분들을 제거한 후 복수의 초음파 A-스캔들 각각의 A-스캔 스펙트럼에 대해 보간이 수행된다.

[0013] 추가 예시적인 실시예에서, 방법이 제시된다. 레이저 초음파 검사 시스템을 사용하여 복합 구조물에 대한 데이터가 획득된다. 데이터에서 구조 신호의 스펙트럼 성분들의 폭 및 주파수가 결정된다. 주파수 도메인에서 데이터로부터 구조 신호의 스펙트럼 성분들이 제거된다. 보간된 데이터를 형성하기 위해, 구조 신호의 스펙트럼 성분들을 제거함으로써 공백으로 남겨진 A-스캔 스펙트럼의 영역을 채우도록 보간 루틴이 수행된다. 구조 신호가 제거된, 처리된 A-스캔을 형성하기 위해, 보간된 데이터에 대해 푸리에 역변환이 수행된다.

[0014] 특징들 및 기능들은 본 개시의 다양한 실시예들에서는 독립적으로 달성될 수 있고 또는 또 다른 실시예들에서는 결합될 수도 있는데, 여기서 추가 세부사항들은 다음 설명 및 도면들을 참조로 확인될 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0015] 예시적인 실시예들의 특성으로 여겨지는 신규한 특징들은 첨부된 청구항들에서 제시된다. 그러나 예시적인 실시예들뿐만 아니라 이들의 선호되는 사용 모드, 추가 목적들 및 특징들 또한, 첨부 도면들과 함께 일동시 본 개시의 예시적인 실시예의 아래의 상세한 설명에 대한 참조에 의해 가장 잘 이해될 것이다.

도 1은 예시적인 실시예가 구현될 수 있는 항공기의 예시이다.

도 2는 예시적인 실시예에 따른 검사 환경의 블록도의 예시이다.

도 3은 예시적인 실시예에 따른 검출기 데이터의 처리의 블록도의 예시이다.

도 4는 예시적인 실시예에 따른 주파수 도메인에서의 초음파 A-스캔 스펙트럼의 예시이다.

도 5는 예시적인 실시예에 따른 주파수 도메인에서의 보간된 초음파 A-스캔 스펙트럼의 예시이다.

도 6은 예시적인 실시예에 따른 3개의 B-스캔들의 예시이다.

도 7은 예시적인 실시예에 따른 시간 도메인에서의 초음파 A-스캔에 대한 이동 윈도우의 예시이다.

도 8은 예시적인 실시예에 따른 B-스캔 이미지 및 주파수 이미지의 예시이다.

도 9는 예시적인 실시예에 따라 복합 구조물에서 재료 변화들을 검출하기 위한 프로세스의 흐름도의 예시이다.

도 10은 예시적인 실시예에 따라 불일치들의 검출을 개선하도록 데이터를 처리하기 위한 프로세스의 흐름도의 예시이다.

도 11은 예시적인 실시예에 따라 불일치들의 검출을 개선하도록 데이터를 처리하기 위한 프로세스의 흐름도의 예시이다.

도 12는 예시적인 실시예에 따른 데이터 처리 시스템의 블록도 형태의 예시이다.

도 13은 예시적인 실시예에 따른 항공기 제조 및 서비스 방법의 블록도 형태의 예시이다.

도 14는 예시적인 실시예가 구현될 수 있는 항공기의 블록도 형태의 예시이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0016] 서로 다른 예시적인 실시예들은 하나 또는 그보다 많은 서로 다른 고려사항들을 인식하여 고려한다. 예를 들어, 예시적인 실시예들은 복합 구조물들의 성능이 조성 및 제작 품질 모두에 의존한다는 것을 인식하여 고려한다. 예시적인 실시예들은 복합 재료들의 구조적 특성들이 응력들에 따른 비가역적인 화학적 및 기계적 열화에 민감할 수 있다는 것을 추가로 인식하여 고려한다. 응력들은 열적 또는 기계적일 수 있다. 예를 들어, 낙

뢰, 제트 엔진 배기, 화재 또는 다른 열 발생들에 의해 복합 재료들이 열 응력들을 받게 될 수 있다.

[0017] 예시적인 실시예들은 열적 또는 기계적 응력들이 복합 구조물의 재료 변화를 야기할 수 있음을 인식하여 고려한다. 이러한 재료 변화들은 복합 구조물의 강도를 떨어뜨릴 수 있다. 예시적인 실시예들은 복합 재료들이 어떠한 명백한 불일치들 없이 강도를 떨어뜨렸을 수도 있다는 것을 추가로 인식하여 고려한다.

[0018] 예시적인 실시예들은 종래의 초음파 및 x선 검사들이 복합 재료들에서 거시적 결함들을 검출할 수 있다는 것을 인식하여 고려한다. 그러나 예시적인 실시예들은 또한 종래의 초음파 및 x선 검사들이 복합 구조물에서 응력 유도 재료 변화들을 검출하지 못한다는 것을 인식하여 고려한다. 예시적인 실시예들은 재료 변화들을 검출하는 종래의 검사 기술들이 표면 변화들로 제한될 수 있다는 것을 인식하여 고려한다. 현재, 어떠한 종래의 검사 기술도 응력 유도 재료 변화들에 대한 전체 복합 재료 볼륨을 평가할 수 없다.

[0019] 이제 도면들을 참조하면, 그리고 특히 도 1을 참조하면, 예시적인 실시예가 구현될 수 있는 항공기의 예시가 도시된다. 이 예시적인 예에서, 항공기(100)는 본체(106)에 부착된 날개(102) 및 날개(104)를 갖는다. 항공기(100)는 날개(102)에 부착된 엔진(108) 및 날개(104)에 부착된 엔진(110)을 포함한다.

[0020] 본체(106)는 꼬리 부분(112)을 갖는다. 수평 안정판(114), 수평 안정판(116) 및 수직 안정판(118)은 본체(106)의 꼬리 부분(112)에 부착된다.

[0021] 항공기(100)는 예시적인 실시예에 따라 레이저 초음파 검사 시스템으로 검사될 수 있는 복합 구조물들을 갖는 항공기의 일례이다. 예를 들어, 날개(102) 또는 날개(104) 중 적어도 하나에서의 복합재 외장이 레이저 초음파 검사 시스템을 사용하여 검사될 수 있다.

[0022] 본 명세서에서 사용되는 바와 같이, 항목들의 리스트에 사용되는 경우에 "~ 중 적어도 하나"라는 문구는, 열거된 항목들 중 하나 또는 그보다 많은 항목의 서로 다른 결합들이 사용될 수 있으며 리스트 내의 각각의 항목 중 단 하나만이 필요할 수도 있음을 의미한다. 즉, "~ 중 적어도 하나"는 리스트로부터 항목들의 임의의 결합 및 임의의 수의 항목들이 사용될 수도 있지만, 리스트 내의 항목들 전부가 요구되는 것은 아님을 의미한다. 항목은 특정 객체, 물건 또는 카테고리일 수도 있다.

[0023] 예를 들어, "항목 A, 항목 B 또는 항목 C 중 적어도 하나"는 제한 없이, 항목 A, 항목 A와 항목 B, 또는 항목 B를 포함할 수도 있다. 이 예는 또한 항목 A, 항목 B 및 항목 C 또는 항목 B와 항목 C를 포함할 수도 있다. 물론, 이러한 항목들의 임의의 결합들이 존재할 수도 있다. 다른 예들에서, "~ 중 적어도 하나"는 예를 들어, 제한 없이, 2개의 항목 A; 1개의 항목 B; 그리고 10개의 항목 C; 4개의 항목 B와 7개의 항목 C; 또는 다른 적당한 결합들일 수도 있다.

[0024] 서로 다른 예시적인 실시예들이 구현될 수 있는 하나의 환경을 예시하기 위해 항공기(100)의 이러한 예시가 제공된다. 도 1의 항공기(100)의 예시는 서로 다른 예시적인 실시예들이 구현될 수 있는 방식에 대한 구성적인 제한들을 의미하려는 것은 아니다. 예를 들어, 항공기(100)는 상용 여객기로 도시된다. 전용 여객기, 희전익 항공기, 또는 다른 적당한 타입들의 항공기와 같은 다른 타입들의 항공기에 서로 다른 예시적인 실시예들이 적용될 수 있다.

[0025] 예시적인 실시예에 대한 예시적인 예들은 항공기에 대해 설명되지만, 예시적인 실시예는 다른 타입들의 플랫폼들에 적용될 수도 있다. 플랫폼은 예를 들어, 모바일 플랫폼, 고정 플랫폼, 육상 기반 구조, 수계 기반 구조 또는 공간 기반 구조일 수 있다. 보다 구체적으로, 플랫폼은 수상함, 탱크, 병력 수송차, 기차, 우주선, 우주 정거장, 위성, 잠수함, 자동차, 제조 설비, 빌딩 또는 다른 적당한 플랫폼들일 수 있다.

[0026] 또한, 예시적인 실시예는 다른 타입들의 복합 구조물들에 적용될 수도 있다. 예를 들어, 플랫폼들 이외의 복합 구조물들은 레이저 초음파 검사 시스템을 사용하여 재료 변화들에 대해 검사될 수 있다. 플랫폼들 이외의 복합 구조물들은 의료 기기, 인공 수족들, 또는 인간들이나 동물들의 신체적 또는 정신적 건강 상태들에 대한 검진, 진단, 치료나 예방 또는 이들의 임의 결합 또는 하위 결합을 위한 임의의 다른 바람직한 제품들을 포함할 수 있다.

[0027] 이제 도 2를 참조하면, 예시적인 실시예에 따라 검사 환경의 블록도의 예시가 도시된다.

[0028] 도시된 바와 같이, 검사 환경(200)은 복합 구조물(202)을 포함한다. 복합 구조물(202)은 임의의 수의 형태들을 취할 수 있다. 예를 들어, 복합 구조물(202)은 항공기에 대한 부품일 수도 있다. 복합 구조물(202)은 다수의 복합 재료들(203)로 구성된다. 또한, 복합 구조물(202)은 복수의 층들(204)로 형성된다. 일부 예시적인 예들

에서, 복수의 층들(204)은 실질적으로 일정한 두께 및 간격을 갖는다.

[0029] 이러한 예시적인 예들에서, 복합 구조물(202)은 패널, 동체 배럴, 스트링거, 날개 보(spar), 리브(rib), 날개 박스, 날개, 안정판 및 다른 적당한 타입들의 부품들 중 하나로부터 선택된 항공기용 복합 부품이다. 복합 구조물(202)은 레이저 초음파 검사 시스템(205)을 사용하여 검사된다. 도시된 바와 같이, 레이저 초음파 검사 시스템(205)은 이동 시스템(206), 검출기(208), 광원(210) 및 제어기(212)를 포함한다.

[0030] 이러한 예시적인 예들에서, 제어기(212)는 레이저 초음파 검사 시스템(205)의 동작을 제어한다. 제어기(212)는 하드웨어, 소프트웨어, 펌웨어, 또는 이들의 결합을 사용하여 구현될 수 있다.

[0031] 이러한 예시적인 예들에서, 제어기(212)는 컴퓨터 시스템(214) 내에 구현될 수 있다. 컴퓨터 시스템(214)은 하나 또는 그보다 많은 컴퓨터들일 수 있다. 컴퓨터 시스템(214)에 하나보다 많은 컴퓨터가 존재할 때, 그러한 컴퓨터들은 네트워크와 같은 통신 매체를 통해 서로 통신할 수 있다.

[0032] 소프트웨어가 사용될 때, 제어기에 의해 수행되는 동작들은 예를 들어, 제한 없이, 프로세서(215)와 같은 프로세서 유닛 상에서 실행되도록 구성된 프로그램 코드를 사용하여 구현될 수 있다. 펌웨어가 사용될 때, 제어기에 의해 수행되는 동작들은 예를 들어, 제한 없이, 프로그램 코드 및 데이터를 사용하여 구현되며 영구 메모리에 저장되어 프로세서 유닛 상에서 실행될 수도 있다.

[0033] 하드웨어가 이용될 때, 하드웨어는 제어기에 의해 수행되는 동작들을 수행하도록 작동하는 하나 또는 그보다 많은 회로들을 포함할 수 있다. 구현에 따라, 하드웨어는 회로 시스템, 집적 회로, 주문형 집적 회로(ASIC: application specific integrated circuit), 프로그래밍 가능 로직 디바이스, 또는 임의의 수의 동작들을 수행하도록 구성된 다른 어떤 적당한 타입의 하드웨어 디바이스 형태를 취할 수도 있다.

[0034] 프로그래밍 가능 로직 디바이스는 특정 동작들을 수행하도록 구성될 수 있다. 디바이스는 이러한 동작들을 수행하도록 영구적으로 구성될 수도 있고 또는 재구성 가능할 수도 있다. 프로그래밍 가능 로직 디바이스는 예를 들어, 제한 없이, 프로그래밍 가능 로직 어레이, 프로그래밍 가능 어레이 로직, 필드 프로그래밍 가능 로직 어레이, 필드 프로그래밍 가능 케이트 어레이, 또는 어떤 다른 타입의 프로그래밍 가능 하드웨어 디바이스의 형태를 취할 수 있다.

[0035] 일부 예시적인 예들에서, 제어기에 의해 수행되는 동작들 및/또는 프로세스들은 무기 컴포넌트들과 통합된 유기 컴포넌트들을 사용하여 수행될 수 있다. 어떤 경우들에는, 동작들 및/또는 프로세스들이 인간을 배제한 완전히 유기 컴포넌트들에 의해 수행될 수 있다. 한 예시적인 예로서, 유기 반도체들의 회로들은 이러한 동작들 및/또는 프로세스들을 수행하는데 사용될 수 있다.

[0036] 이동 시스템(206)은 광원(210) 및 검출기(208)를 복합 구조물(202)에 대해 이동시키도록 구성된다. 이동 시스템(206)은 다수의 서로 다른 타입들의 시스템들을 사용하여 구현될 수 있다. 일례로, 이동 시스템(206)은 로봇이다. 로봇은 예를 들어, 다수의 축들을 중심으로 검출기(208)를 이동시킬 수 있는 로봇 팔일 수도 있다. 이동 시스템(206)은 또한 예를 들어, 제한 없이, 캔트리 로봇, 수작업 스캐닝 헤드, 및 다른 적당한 타입들의 이동 시스템들일 수도 있다.

[0037] 광원(210)은 복합 구조물(202)의 표면(218)으로 제 1 광(216)을 전달하도록 구성된다. 일부 예시적인 예들에서, 광원(210)은 레이저(219)일 수도 있다. 한 특정 예에서, 레이저(219)는 다이오드 펌프 나노초 레이저이다. 광원(210)이 레이저(219) 형태를 취할 때, 제 1 광(216)은 펄스형 레이저 범(220)일 수도 있다.

[0038] 이 예시적인 예에서, 제 1 광(216)은 복합 구조물(202)의 표면(218) 상에 제 1 패턴(222)을 형성하는 방식으로 전달된다. 이러한 예시적인 예들에서, 제 1 광(216)의 제 1 패턴(222)은 제 1 광(216)이 표면(218) 상에 조명되는 복수의 영역들이다. 이러한 영역들은 원형, 타원형, 정사각형, 사선형이거나 표면으로의 투사 각도에 따라 어떤 다른 형상을 가질 수 있다. 일부 예시적인 예들에서, 제 1 패턴(222)은 선의 형태를 취한다.

[0039] 제 1 광(216)은 제 1 광(216)이 복합 구조물(202)을 만날 때 복합 구조물(202) 내에 음향파들(224)을 발생시키도록 구성된다. 제 1 광(216)이 복합 구조물(202)의 표면(218)으로 전달될 때 음향파들(224)이 발생한다. 예를 들어, 제 1 광(216)의 에너지는 복합 구조물(202)에서 열탄성 팽창을 발생시킨다. 열탄성 팽창은 복합 구조물(202)에서 음향파들(224)을 야기한다.

[0040] 이러한 예시적인 예들에서, 음향파들(224)은 초음파들이다. 따라서 음향파들(224)은 초음파 신호들이다. 보다 구체적으로, 음향파들(224)은 광대역 초음파 신호들(226)의 형태를 취한다. 광대역 초음파 신호들(226)은 50% 보다 크거나 같은 대역폭을 가질 수 있다. 이러한 예들에서, 펄스의 주파수들의 범위는 펄스의 특성 주파수의

50%보다 크거나 같다.

[0041] 음향파들(224)은 예를 들어, 특정 구현에 따라 약 20 킬로헤르츠 내지 약 100 메가헤르츠의 주파수를 가질 수 있다. 음향파들(224)에 대한 주파수는 복합 구조물(202)을 형성하는데 사용되는 재료, 레이저 여기의 펄스 폭, 및 다른 적당한 인자들에 의존한다.

[0042] 추가로, 검출기(208)는 음향파들(224)에 대한 제 1 응답(228)을 검출하도록 구성된다. 제 1 응답(228)은 복합 구조물(202) 내에서 이동하는 음향파들(224)에 대한 산란, 반사, 변조 및 다른 변화들의 결과로서 발생할 수 있는 음향파들(229)을 포함한다. 제 1 응답(228)은 음향파들(224)에 대한 응답으로 발생하는 음향파들(229)로 구성된다. 이 예시적인 예에서, 제 1 응답(228)은 검출기(208)에 의해 검출된다.

[0043] 일부 예시적인 예들에서, 검출기(208)는 광 검출기(230)의 형태를 취한다. 일부 예시적인 예들에서, 검출기(208)는 포인트 검출기(232)이다. 일례로, 검출기(208)는 임의의 형태의 간섭계를 포함할 수 있다. 예를 들어, 검출기(208)는 후방 산란된 초음파의 비접촉식 검출을 위한 광섬유 변형 사냑(Sagnac) 간섭계를 포함한다. 검출기(208)는 복합 구조물(202)의 표면(218) 상으로 제 2 광(234)을 전달하고 제 2 광(234)에 대한 제 2 응답(236)을 검출한다.

[0044] 한 예시적인 예에서, 제 2 광(234)은 제 2 패턴(238)의 형태로 복합 구조물(202)의 표면(218)으로 전달된다. 이 예시적인 예에서, 제 2 패턴(238)은 포인트의 형태를 취한다.

[0045] 제 2 응답(236)은 이 예시적인 예에서 제 1 응답(228)에 의해 반사된 제 2 광(234)이다. 복합 구조물(202) 내에서 이동하는 음향파들(224)에 의해 야기된 제 1 응답(228)이 표면(218)에 도달하여 검출된다. 일부 예시적인 예들에서, 제 1 응답(228)의 검출은 제 2 광(234)과 같은 기준 광을 전송하고 제 2 응답(236)에서 표면(218) 상의 기계적 진동들을 검출하는 간섭계를 사용하여 검출된다. 검출기(208)는 임의의 바람직한 형태의 간섭계를 포함한다.

[0046] 제 2 응답(236)이 검출되면 검출기(208)가 제어기(212)에 데이터(240)를 전송한다. 데이터(240)는 출력(242)을 발생시키기 위해 제어기(212)에 의해 사용된다. 일부 예들에서, 데이터(240)는 검사되는 복합 구조물(202)의 위치에 대한 전체 대역폭 신호를 포함한다. 데이터(240)가 복합 구조물(202)의 복수의 위치들에 대한 수신 신호들을 포함할 때, 데이터(240)는 복수의 초음파 A-스캔들을 포함한다. 레이저 초음파 검사 시스템(205)이 복합 구조물(202)을 가로질러 스캔될 때, 복합 구조물(202) 상의 복수의 위치들에 대한 데이터(240)가 수집된다.

[0047] 도시된 바와 같이, 출력(242)은 복합 구조물(202)에 불일치(244)가 존재하는지 여부를 표시한다. 불일치(244)는 예를 들어, 제한 없이, 주름들(245), 재료 변화들(246), 박리(247), 보이드들(248), 그리고 복합 구조물(202)의 다른 바람직하지 않은 특징들 또는 특성들일 수도 있다. 일부 예시적인 예들에서, 재료 변화들(246)은 "로컬"로 지칭될 수 있다. 로컬 재료 변화들(246)은 레이저 초음파 검사 시스템(205)을 사용하여 검사된 복합 구조물(202) 영역에서의 불일치(244)를 의미한다. 재료 변화들(246)은 펄스형 레이저 빔(220)을 복합 구조물(202) 쪽으로 향하게 하기 전에 복합 구조물(202)에 대한 열 응력을 또는 물리적 응력을 중 적어도 하나로부터 야기된다.

[0048] 출력(242)은 임의의 바람직한 형태를 취한다. 예를 들어, 출력(242)은 경보(250)의 형태를 취할 수 있다. 경보(250)는 불일치(244)가 존재하는지 여부를 표시한다. 경보(250)는 컴퓨터 시스템(214) 내의 디스플레이 디바이스(252) 상에 디스플레이될 수 있다.

[0049] 다른 예시적인 예에서, 출력(242)은 이미지(253)이다. 이미지(253)는 또한 디스플레이 디바이스(252) 상에 디스플레이될 수 있다. 한 예시적인 예에서, 이미지(253)는 복합 구조물(202)에 불일치(244)가 존재할 때 그래픽 표시자(254)를 갖는 복합 구조물(202)의 일부 또는 전부의 이미지이다. 일례로, 불일치(244)가 검출되는 복합 구조물(202) 내의 위치에 대응하는 이미지(253)의 위치에 그래픽 표시자(254)가 디스플레이된다. 다른 예시적인 예들에서, 불일치(244)가 존재하지 않는다면, 불일치(244) 부재를 나타내도록 그래픽 표시자(254)가 디스플레이될 수 있다.

[0050] 일부 예시적인 예들에서, 이미지(253)는 광학 이미지(256)이다. 광학 이미지(256)는 복합 구조물(202)의 표면(218)의 이미지일 수도 있다.

[0051] 다른 예시적인 예들에서, 이미지(253)는 복합 구조물(202)의 일부의 표현이다. 예를 들어, 초음파 A-스캔(258), 초음파 A-스캔 스펙트럼(259), B-스캔(260) 또는 C-스캔(262)으로부터 이미지(253)가 선택된다. 초음파 A-스캔(258) 및 초음파 A-스캔 스펙트럼(259)은 각각 그래프일 수 있다. 초음파 A-스캔 스펙트럼(259)은 주파

수 도메인(264)에서 디스플레이된다. 초음파 A-스캔 스펙트럼(259)은 초음파 A-스캔(258)의 푸리에 변환에 의해 계산된다. 초음파 A-스캔(258)은 시간 도메인(266)에 있다. 시간 도메인(266)에서의 초음파 A-스캔(258)은 주파수 도메인(264)에서 초음파 A-스캔 스펙트럼(259)에 대해 푸리에 역변환을 수행함으로써 얻어진다. 일례로, 주파수 도메인(264)은 주파수인 x축 그리고 진폭인 y축을 갖는다. 일례로, 시간 도메인(266)은 시간인 x축 그리고 진폭인 y축을 갖는다.

[0052] 일부 예시적인 예들에서, 초음파 A-스캔(258)은 데이터(240)의 표현일 수 있다. 그 결과, 데이터(240)는 초음파 A-스캔(258)을 포함한다고 할 수 있다. 다른 예시적인 예들에서, 초음파 A-스캔(258)은 데이터(240)가 처리된 이후 데이터(240)의 일부의 표현일 수 있다.

[0053] 초음파 A-스캔(258)은 복합 구조물(202)의 위치를 나타낸다. 초음파 A-스캔(258)으로부터의 데이터는 복합 구조물(202)의 서로 다른 위치들의 복수의 초음파 A-스캔들로부터의 데이터와 결합되어 B-스캔(260)을 형성한다. B-스캔(260)은 컬러 또는 그레이스케일 이미지 중 적어도 하나일 수 있다. B-스캔(260)에서 각각의 픽셀의 값은 복합 구조물(202)의 대응하는 위치의 제 2 응답(236)의 세기를 나타낸다.

[0054] 일례로, B-스캔(260)은 스캐닝 거리인 x축 그리고 시간인 y축을 갖는다. B-스캔(260)은 데이터(240)의 표현 또는 데이터(240)가 처리된 이후 데이터(240)의 표현일 수 있다.

[0055] C-스캔(262)은 복합 구조물(202)의 전부 또는 일부를 나타낸다. 일례로, C-스캔(262)은 복합 구조물(202)의 전부 또는 일부와 동일한 2차원 형상을 갖는다. 일부 예시적인 예들에서, C-스캔(262)은 그레이스케일 이미지이다. 다른 예시적인 예들에서, C-스캔(262)은 컬러 이미지이다. C-스캔(262)에서 각각의 픽셀의 값은 임의의 바람직한 정보를 나타낸다. 일례로, C-스캔(262)에서 각각의 픽셀의 값은 복합 구조물(202)에서 불일치(244)의 위치들을 나타낸다. 보다 구체적으로, C-스캔(262)에서 각각의 픽셀의 값은 복합 구조물(202)에서 재료 변화들(246)의 위치들을 나타낼 수 있다.

[0056] 다른 예시적인 예에서, 이미지(253)는 주파수 이미지(268)의 형태를 취한다. 주파수 이미지(268)는 x축 및 y축 타입들에서 B-스캔(260)과 또는 C-스캔(262)과 비슷하다. 예를 들어, 주파수 이미지(268)는 스캐닝 거리인 x축 그리고 시간인 y축을 가질 수 있다. 그러나 주파수 이미지(268)에서 각각의 픽셀의 세기는 데이터(240)를 처리함으로써 결정된 평균 주파수 또는 최대 주파수와 같은 주파수를 나타낸다. 주파수 이미지(268)는 주파수 이미지(268)로 표현된 복합 구조물(202)의 일부에서 재료 변화들(246)의 존재를 표시한다.

[0057] 또 다른 예시적인 예에서, 출력(242)은 보고(270)의 형태를 취한다. 보고(270)는 복합 구조물(202)에서 임의의 불일치들을 식별할 수 있다. 보고(270)는 또한 불일치들의 위치, 불일치들의 타입들, 불일치들의 크기들, 및 다른 적당한 타입들의 정보와 같은 다른 정보를 포함할 수 있다.

[0058] 일부 예시적인 예들에서, 보고(270)는 주파수 값(272)을 포함한다. 주파수 값(272)은 레이저 초음파 검사 시스템(205)을 사용하여 검사된 복합 구조물(202)의 모든 위치들에 대한 또는 복합 구조물(202)의 일부에 대한 평균 주파수들 또는 최대 주파수들의 평균이다. 주파수 값(272)을 평균하기 위한 복합 구조물(202)의 샘플 볼륨은 초기 재료 특성들, 검출할 비균질성들의 스케일, 측정들의 정확도 또는 다른 특징들 중 적어도 하나에 의해 결정된다. 주파수 값(272)은 복합 구조물(202)에서 재료 변화들(246)의 존재 또는 부재를 나타낸다. 주파수 값(272)은 "로컬"로 지칭될 수 있다. 로컬 주파수 값(272)은 로컬 재료 변화들(246)이 결정될 특정 볼륨의 재료에 대해 결정된 평균 주파수들 또는 최대 주파수들의 로컬 값들의 평균이다.

[0059] 일례로, 주파수 값(272)이 복합 구조물 표준(276)의 주파수 값(274)과 비교된다. 복합 구조물 표준(276)은 복합 구조물(202)과 동일한 레이업(layup) 및 재료들을 갖는다. 복합 구조물 표준(276)은 바람직한 구조적 특성들을 갖도록 검증된다. 주파수 값(272)이 복합 구조물 표준(276)의 주파수 값(274)과 다를 때, 주파수 값(272)은 복합 구조물(202)에서 재료 변화들(246)을 표시할 수 있다. 따라서 출력(242)은 경보(250), 이미지(253), 보고(270) 또는 다른 적당한 타입들의 출력 중 적어도 하나일 수 있다.

[0060] 도 2의 제조 환경(200)의 예시는 예시적인 실시예가 구현될 수 있는 방식에 대한 물리적 또는 구성적 제한들을 의미하려는 것은 아니다. 예시된 것들에 추가로 또는 그 대신 다른 컴포넌트들이 사용될 수도 있다. 일부 컴포넌트들은 불필요할 수도 있다. 또한, 블록들은 일부 기능 컴포넌트들을 예시하기 위해 제시된다. 이러한 블록들 중 하나 또는 그보다 많은 블록은 예시적인 실시예로 구현될 때, 결합되거나, 분할되거나, 또는 결합되어 서로 다른 블록들로 분할될 수도 있다.

[0061] 예를 들어, 검사 환경(200)은 복합 구조물(202)을 포함하지만, 일부 예시적인 예들에서, 검사 환경(200)은 대신에 임의의 바람직한 재료의 구조물을 포함할 수도 있다. 예를 들어, 검사 환경(200)은 복수의 층들을 갖는 임

의의 바람직한 재료로 만들어진 구조물을 포함할 수 있다.

[0062] 이제 도 3을 참조하면, 예시적인 실시예에 따라 검출기 데이터의 처리의 블록도의 예시가 도시된다. 전체 대역폭 신호(302)의 처리(300)가 도 2의 컴퓨터 시스템(214)에서 수행될 수 있다. 전체 대역폭 신호(302)는 검출기(208)에 의해 수집된 데이터일 수 있다. 사용되는 검출기는 전체 대역폭 신호(302)에서 대역폭을 제한할 수 있다. 한 예시적인 예에서, 검출기 대역폭 최대치는 10MHz일 수 있다. 검출기는 예상된 구조 신호가 전체 대역폭 신호(302) 내에 포지셔닝되도록 선택될 수 있다. 예를 들어, 예상된 구조 신호가 대략 7MHz라면, 검출 대역폭은 7MHz보다 더 높아야 한다. 전체 대역폭 신호(302)의 처리(300)는 도 2의 프로세서(215)에 의해 수행될 수 있다.

[0063] 전체 대역폭 신호(302)는 도 2의 데이터(240)의 전부 또는 일부일 수 있다. 일부 예시적인 예들에서, 전체 대역폭 신호(302)는 A-스캔(303)으로 지칭될 수 있다. A-스캔(303)은 B-스캔(304)의 일부이다. B-스캔(304)은 A-스캔(303) 이외의 추가 A-스캔들을 포함할 수 있다. A-스캔(303)은 복합 구조물 상에서 제 1 위치에 대한 데이터이다. B-스캔(304)의 추가 A-스캔들은 동일한 복합 구조물의 다른 위치들을 포함한다.

[0064] 전체 대역폭 신호(302)는 구조 신호(305) 또는 무구조 신호(306) 중 하나를 생성하기 위한 처리(300)를 겪는다. 구조 신호(305)는 복수의 규칙적인 층들을 갖는 구조물에 도 2의 재료 변화들(246)과 같은 재료 변화들이 존재하는지 여부를 결정하는데 사용될 수 있다. 일부 예시적인 예들에서, 구조 신호(305)는 규칙적인 구조 신호로 지칭된다. 무구조 신호(306)는 복수의 층들을 갖는 구조물에서 거시적 불일치들의 검출을 증가시킨다. 무구조 신호(306)는 불일치들의 보다 명확한 이미지를 도시한다. 일부 예시적인 예들에서, 무구조 신호(306)는 무구조 초음파 A-스캔으로 지칭된다.

[0065] 처리(300)는 임의의 바람직한 일련의 동작들을 포함한다. 예를 들어, 처리(300)는 저역 통과 필터(308), 보간(310), 이동 윈도우(312) 또는 예측(314) 중 적어도 하나를 포함한다. 처리(300)의 바람직한 일련의 동작들이 임의의 바람직한 순서로 수행된다.

[0066] 한 예시적인 예에서, 구조 신호(305)를 형성하기 위한 전체 대역폭 신호(302)에 대한 처리(300)는 이동 윈도우(312) 그리고 다음에 예측(314)을 포함한다. 일부 예시적인 예들에서, 이동 윈도우(312)는 필터이다. 일부 예시적인 예들에서, 이동 윈도우(312)는 시간 도메인에서 A-스캔(303)에 적용된다.

[0067] 일정 기간의 시간 동안 전체 대역폭 신호(302) 중 단지 몇 개의 신호들만이 이동 윈도우(312) 내에 포함되도록 전체 대역폭 신호(302)에 이동 윈도우(312)가 적용된다. 일부 예시적인 예들에서, 이동 윈도우(312)는 가우스 형상이다. 가우스 형상은 주파수 분해능과 시간 분해능 사이의 유리한 절충을 제공한다. 주파수 분해능은 주파수 도메인에서 정확한 제거 및 보간을 제공한다. 시간 분해능은 주파수 이미지에서 공간 분해능을 제공한다.

[0068] 이동 윈도우(312)는 샘플링 크기 또는 시간에 관해 기술된다. 이동 윈도우(312)에 대한 최소 윈도우 크기는 질의(interrogating) 펄스의 지속기간이다. 이동 윈도우(312)는 일반적으로 주파수 도메인에서 더 양호한 스펙트럼 분해능을 얻도록 이 지속기간보다 더 길다. 시간 도메인에서의 지속기간은 주파수 도메인에서의 분해능에 반비례한다. 이동 윈도우(312)에 대한 특징들의 선택은 주파수 도메인에서 요구되는 분해능과 시간 도메인에서 요구되는 분해능 사이의 절충에 의해 결정된다. 앞서 논의한 바와 같이, 가우스 형상은 이러한 절충을 최적화 할 수 있다.

[0069] 이동 윈도우(312)는 이동 윈도우(312)가 단지 원하는 수의 플라이(ply)들을 포함하도록 크기가 정해진다. 일례로, 이동 윈도우(312)는 2개 내지 7개의 플라이들로부터의 임의의 바람직한 개수의 플라이들을 포함한다. 예를 들어, 이동 윈도우(312)는 3개의 플라이들을 포함할 수 있다. 다른 예에서, 이동 윈도우(312)는 5개의 플라이들을 포함한다.

[0070] 한 예시적인 예에서, 이동 윈도우(312)는 35개의 샘플 포인트들(1/e 레벨, 샘플당 5ns)의 지름을 갖는 한편, 복합 구조물의 하나의 플라이 내에서의 비행 시간은 약 14개의 샘플 포인트들이다. 따라서 이 예에서, 윈도우형 신호는 몇 개의 플라이들을 포함한다.

[0071] 이동 윈도우(312)가 전체 대역폭 신호(302)에 적용될 때마다, 윈도우형 신호(316)가 형성된다. 각각의 윈도우형 신호에 대해, 예측(314)이 수행될 수 있다. 예측(314)은 주파수 측정(317)을 결정한다. 한 예시적인 예에서, 주파수 측정(317)은 평균 주파수(318)이다. 다른 예시적인 예에서, 주파수 측정(317)은 최대 주파수(320)이다.

[0072] 평균 주파수(318)는 임의의 바람직한 방법을 사용하여 결정될 수 있다. 일례로, 평균 주파수(318)는 다음 식에

따라 A-스캔(303)의 원도우형 신호(316)의 복소 분석 표현의 자기 상관 함수 $\hat{R}(t)$ 를 사용하여 결정된다:

$$f_{mean} = \frac{1}{2\pi i} \frac{\hat{R}(0)}{R(0)} = \frac{1}{2\pi} \dot{\phi}(0) \quad (1)$$

[0073] [0074] $R(0)$ 은 0 시점에서의 복소 자기 상관 함수 $\hat{R}(t)$ 의 크기이고, $\dot{\phi}(0)$ 은 0 시점에서의 복소 자기 상관 함수의 위상이다. 함수 위의 점은 해당 함수의 시간 미분을 나타낸다. A-스캔의 N-포인트 샘플링된 버전의 경우, 식 (1)은 다음과 같이 되며:

$$f_{mean} = \tan^{-1} \left[\frac{im R_N(1)}{re R_N(1)} \right] \quad (2)$$

[0075] [0076] 여기서 $R_N(1)$ 은 샘플 포인트 1에서 평가된 N-포인트 복소 자기 상관 함수 R_N 이며, im 은 복소 자기 상관 함수의 허수부를 의미하고, re 는 복소 자기 상관 함수의 실수부를 의미한다.

[0077] 전체 대역폭 신호(302)의 각각의 원도우형 신호(316)에 대해 평균 주파수(318)가 결정된다. 또한, 일부 예들에서는, 전체 대역폭 신호(302) 이외의 다른 전체 대역폭 신호들에 대해 평균 주파수(318)가 결정된다. 예를 들어, B-스캔(304)의 각각의 A-스캔의 각각의 원도우형 신호(316)에 대해 평균 주파수(318)가 결정될 수도 있다.

[0078] 일부 예시적인 예들에서, B-스캔(304)의 각각의 A-스캔의 각각의 원도우형 신호(316)의 평균 주파수(318)를 결정한 후, 평균 주파수(318) 값들이 주파수 이미지(322)를 형성할 것이다. 주파수 이미지(322)는 도 2의 주파수 이미지(268)의 한 구현일 수 있다. 주파수 이미지(322)는 B-스캔(304)의 각각의 A-스캔의 각각의 원도우형 신호(316)의 각각의 평균 주파수(318)를 포함한다. 주파수 이미지(322)에서 재료 변화들이 명백할 수 있다. 예를 들어, 주파수 이미지(322)의 픽셀들의 세기가 물질 변화를 나타낸다.

[0079] 일부 예시적인 예들에서, B-스캔(304)의 각각의 A-스캔의 각각의 원도우형 신호(316)의 평균 주파수(318)를 결정한 후, 평균 주파수(318) 값들이 주파수 값(324)을 결정하는데 사용된다. 주파수 값(324)이 재료 변화들을 나타낼 수 있다.

[0080] 주파수 측정(317)이 최대 주파수(320)일 때, 임의의 바람직한 방법을 사용하여 최대 주파수(320)가 예측될 수 있다. 일례로, 최대 주파수(320)는 다음 식을 사용하여 예측되며:

$$S_n = \sum_{k=1}^p a_k * S_{n-k} \quad (3)$$

[0081] 여기서 p 는 계수들의 양이고, S_n 은 샘플 포인트 n 에서의 A-스캔 신호이다.

[0082] 다른 예시적인 예에서, 전체 대역폭 신호(302)에 대한 처리(300)는 무구조 신호(306)를 생성한다. 예를 들어, 이동 원도우(312)가 시간 도메인에서 전체 대역폭 신호(302)에 적용되어 원도우형 신호(316)를 형성한다. 각각의 원도우형 신호(316)에 대해 예측(314)이 수행될 수 있다. 일부 예시적인 예들에서, 예측(314)은 평균 주파수(318) 또는 최대 주파수(320) 중 적어도 하나를 사용하여 구조 신호(305)의 스펙트럼 성분들(326)을 결정한다. 구조 신호(305)의 스펙트럼 성분들(326)은 주파수 도메인에서의 주파수 및 폭을 포함한다.

[0083] [0084] 구조 신호(305)는 복합 구조물의 주기성으로부터 야기되는 시간 도메인에서의 A-스캔의 컴포넌트 또는 일부이다. 스펙트럼 성분들(326)은 복합 구조물의 주기성으로부터 야기되는 주파수 도메인에서의 A-스캔 스펙트럼의 컴포넌트 또는 일부이다. 시간 도메인에서의 신호에 대한 대응하는 함수는 주파수 도메인에서의 신호의 스펙트럼 또는 간단히 스펙트럼으로 지칭된다.

[0085] 신호의 푸리에 변환이 스펙트럼을 야기한다. 스펙트럼의 푸리에 역변환이 신호를 야기한다.

[0086] 구조 신호(305)의 스펙트럼 성분들(326)을 결정한 후, 구조 신호(305)의 스펙트럼 성분들(326)이 전체 대역폭 신호(302)로부터 제거될 수 있다. 일례로, 주파수 도메인에서 A-스캔 스펙트럼으로부터 구조 신호(305)의 스펙트럼 성분들(326)이 제거된다. 전체 대역폭 신호(302)로부터 구조 신호(305)의 스펙트럼 성분들(326)을 제거함으로써 스펙트럼의 한 영역이 공백으로 남는다.

[0087] 전체 대역폭 신호(302)로부터 구조 신호(305)의 스펙트럼 성분들(326)을 제거함으로써 공백으로 남겨진 스펙트

럼의 영역을 채우도록 보간(310)이 수행된다. 보간(310)은 2개의 포인트들 사이에 새로운 데이터 포인트들을 구성하는 방법이다. 보간(310)은 임의의 바람직한 식을 사용하여 그리고 임의의 바람직한 수학적 방법을 사용함으로써 수행될 수 있다. 보간은 주파수 도메인에서 수행될 수 있다. 일례로, 보간은 A-스캔 스펙트럼에 대해 수행된다. 보간(310)은 선형 보간의 형태를 취할 수 있다. 예를 들어, 보간된 데이터에 대해 푸리에 역변환(308)이 수행되어 시간 도메인에서 A-스캔들을 형성한다.

[0088] 보간(310)을 수행함으로써, 무구조 신호(306)가 형성된다. 보간(310)을 완료한 후, 무구조 신호(306)에 대해 저역 통과 필터(308)가 사용될 수 있다. 무구조 신호(306)에는 임의의 바람직한 필터가 사용된다. 일부 예시적인 예들에서, 필터는 아래와 같이 표현될 수 있다:

$$Filter(f) = (1 - \exp\left(-\left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right) * \exp\left(-\left(\frac{f}{f_1}\right)^2 - \left(\frac{f}{f_2}\right)^4\right) \quad (4)$$

[0089] [0090] 한 예시적인 예에서, 파라미터들은: $f_0 = 100\text{kHz}$, $f_1 = 11\text{MHz}$ 그리고 $\frac{f_2}{f_1} = 1.2$ 를 포함할 수 있다.

[0091] 일부 예시적인 예들에서는, 11MHz 대신, $f_1 = 5\text{MHz}$ 이다. 이 경우, 정규 구조 주기보다 더 작은 크기의 미시적 비균질성이 또한 대역 통과 필터링된 신호에서 제거될 것이다. 따라서 대규모 불일치들이 강조될 것이다.

[0092] 저역 통과 필터(308)를 사용한 후, 시간 도메인에서 필터링되고 보간된 데이터가 무구조 B-스캔 이미지(330)를 디스플레이하는데 사용될 수 있다. 무구조 B-스캔 이미지(330)는 다공성, 박리 또는 다른 거시적 불일치들과 같은 거시적 불일치들 또는 미시적 불일치들 모두를 나타낸다. 미시적 불일치들은 정규 구조의 주기보다 더 작은 크기의 불일치들일 수 있다.

[0093] 이제 도 4를 참조하면, 예시적인 실시예에 따라 주파수 도메인에서의 초음파 A-스캔 스펙트럼의 예시가 도시된다. 이미지(400)는 도 2의 이미지(253)의 물리적 구현일 수 있다. 이미지(400)는 A-스캔 스펙트럼(402)을 포함한다. 주파수 도메인의 A-스캔 스펙트럼(402)이 A-스캔의 푸리에 변환으로부터 계산된다. A-스캔 스펙트럼(402)은 도 2의 주파수 도메인(264)에서의 초음파 A-스캔 스펙트럼(259)의 일례이다. A-스캔 스펙트럼(402)은 시간 도메인(266)에서의 초음파 A-스캔(258)의 푸리에 변환이다.

[0094] A-스캔 스펙트럼(402)은 (도시되지 않은) 구조 신호의 스펙트럼 성분들(404)을 포함한다. 스펙트럼 성분들(404)은 예측을 사용하여 식별될 수 있다. 이미지(400)는 x축(406) 및 y축(408)을 갖는다. 이 예에서, A-스캔 스펙트럼(402)은 주파수 도메인에 있다. 이에 따라, x축(406)은 MHz 단위의 주파수이고, y축(408)은 크기이다. 스펙트럼 성분들(404) 주위의 스펙트럼 영역(410)은 구조 신호 스펙트럼의 폭을 기초로 정의될 수 있다. 이 예시적인 실시예에서, 스펙트럼 영역(410)은 평균 주파수 $\pm (2 \times (\text{스펙트럼 성분들}(404) \text{과 연관된 스펙트럼의 폭}))$ 이다. 주파수 도메인에서 구조 신호 스펙트럼의 폭은 초음파 A-스캔의 원도우형 신호의 복소 분석 표현의 자기 상관 함수 $\hat{R}_{\text{N}}(t)$ 를 사용하여 추정된다. A-스캔의 N-포인트 샘플링된 베전의 경우, 폭 = $\frac{2}{N} \left[1 - \frac{|R_{\text{N}}(1)|}{R_{\text{N}}(0)} \right]$ 이고, 여기서 $|R_{\text{N}}(1)|$ 은 샘플 포인트 1에서 평가된 N-포인트 복소 자기 상관 함수 R_{N} 의 크기이고, $R_{\text{N}}(0)$ 은 샘플 포인트 0에서 평가된 N-포인트 복소 자기 상관 함수 R_{N} 이다.

[0095] 이제 도 5를 참조하면, 예시적인 실시예에 따라 주파수 도메인에서의 보간된 초음파 A-스캔 스펙트럼의 예시가 도시된다. 이미지(500)는 도 2의 이미지(253)의 물리적 구현이다. 이미지(500)는 A-스캔 스펙트럼(502)을 포함한다. 주파수 도메인의 A-스캔 스펙트럼(502)이 A-스캔의 푸리에 변환으로부터 계산된다. A-스캔 스펙트럼(502)은 도 2의 주파수 도메인(264)에서의 초음파 A-스캔 스펙트럼(259)의 일례이다. A-스캔 스펙트럼(402)은 도 2의 주파수 도메인(264)에서의 초음파 A-스캔(258)의 푸리에 변환이다.

[0096] 주파수 도메인의 A-스캔 스펙트럼(502)은 구조 신호의 스펙트럼 성분들(404)이 제거된, 주파수 도메인에서의 A-스캔 스펙트럼(402)의 도면이다. 이미지(500)는 x축(504) 및 y축(506)을 갖는다. x축(504)은 MHz 단위의 주파수이다. y축(506)은 크기이다.

[0097] 이미지(500)로부터 확인될 수 있는 바와 같이, A-스캔 스펙트럼(502)은 영역(508)을 포함한다. 영역(508)은 보간에 의해 생성된 다수의 포인트들을 포함한다. 이 예시적인 예에서, 보간은 선형 보간의 형태를 취한다. 영역(508)은 도 4의 스펙트럼 영역(410)과 동일한 폭을 갖는다. 영역(508)은 스펙트럼 성분들(404)이 제거된 A-

스캔 스펙트럼(502) 부분이다.

[0098] 도 5의 A-스캔 스펙트럼(502)은 주파수 도메인에서 제시된다. 이미지(500)에서 A-스캔 스펙트럼(502)을 푸리에 역변환함으로써 A-스캔과 동등한 시간 도메인 표현이 얻어질 수 있다.

[0099] 이제 도 6을 참조하면, 예시적인 실시예에 따라 3개의 B-스캔들의 예시가 도시된다. 이미지(600)는 도 2의 이미지(253)의 물리적 구현이다. 이미지(600)는 B-스캔(602), B-스캔(604) 및 B-스캔(606)을 포함한다. B-스캔(602), B-스캔(604) 및 B-스캔(606)은 각각 도 2의 B-스캔(260)의 각각의 예들이다. B-스캔(602), B-스캔(604) 및 B-스캔(606) 각각은 시간 도메인에서의 데이터로부터 형성된다.

[0100] B-스캔(602)은 구조물 제거 처리 없는 전체 대역폭 신호의 B-스캔 이미지이다. B-스캔(602)은 처리 없이 시간 도메인에서의 A-스캔들로부터 형성된다.

[0101] B-스캔(604)은 구조 신호의 스펙트럼 성분들이 제거되고 주파수 도메인에서 보간된 전체 대역폭 신호의 B-스캔 이미지이다. 예를 들어, B-스캔(604)은 구조 신호가 없는 B-스캔(602)의 이미지이다. 시간 도메인에서 A-스캔을 처리함으로써 구조 신호의 스펙트럼 성분들이 식별된다. A-스캔에 대해 푸리에 변환함으로써 주파수 도메인에서의 A-스캔 스펙트럼이 생성된다. 이후, 식별된 스펙트럼 성분들이 주파수 도메인의 A-스캔 스펙트럼으로부터 제거된다. 보간은 또한 주파수 도메인의 A-스캔 스펙트럼에서 발생할 수도 있다. 이후, 푸리에 역변환이 수행되어 구조 신호의 스펙트럼 성분들이 없는 A-스캔 스펙트럼을 시간 도메인으로 변환하여 A-스캔을 형성한다.

[0102] B-스캔(606)은 구조 신호의 스펙트럼 성분들의 제거 및 주파수 도메인에서의 보간 이후 저역 통과 필터링된 B-스캔 이미지이다. 예를 들어, B-스캔(606)은 저역 통과 필터가 적용된 이후 B-스캔(604)의 이미지이다.

[0103] 이미지(600)에서 확인될 수 있는 바와 같이, B-스캔(606)에서의 불일치들은 B-스캔(604) 또는 B-스캔(602)에서의 불일치들보다 더 많이 정의된다. 따라서 전체 대역폭 신호로부터 구조 신호의 스펙트럼 성분들을 제거하는 것은 불일치들의 검출 가능성을 향상시킨다. B-스캔(602)은 x축(608) 및 y축(610)을 갖는다. x축(608)은 A-스캔 번호로 표현된 스캐닝 거리이다. y축(610)은 깊이이다.

[0104] 구조 신호의 스펙트럼 성분들을 제거함으로써, 저역 통과 필터가 전체 대역폭 신호의 직접적인 필터링에 비해 확장되었다. 더 높은 대역폭의 저역 통과 필터는 불일치들을 도시한 B-스캔(606)에서 더 높은 공간 분해능을 제공한다.

[0105] 이제 도 7을 참조하면, 예시적인 실시예에 따라 시간 도메인에서의 초음파 A-스캔 상의 이동 윈도우의 예시가 도시된다. 이미지(700)는 도 2의 이미지(253)의 물리적 구현이다. 이미지(700)는 A-스캔(702)을 포함한다. A-스캔(702)은 도 2의 시간 도메인(266)에서의 초음파 A-스캔(258)의 일례이다. 이동 윈도우(704)는 A-스캔(702) 위에 포지셔닝된다.

[0106] 이미지(700)는 x축(706) 및 y축(708)을 갖는다. 이 예에서, A-스캔(702)은 시간 도메인에 있다. 이에 따라, x 축(706)은 마이크로초 단위의 시간이고, y축(708)은 진폭이다.

[0107] 이동 윈도우(704)가 A-스캔(702)에 적용되어 주파수 측정들을 결정한다. 이동 윈도우(704)는 복합 구조물들의 다수의 플라이들을 포함한다. 이 예시적인 예에서, 이동 윈도우(704)는 A-스캔(702)에 대해 5개의 플라이들을 포함한다.

[0108] 이동 윈도우(704)는 이미지(700)에서 방향(710)으로 이동되어 다수의 윈도우형 신호들을 형성한다. A-스캔(702)의 각각의 윈도우형 신호에 대해 주파수 측정들이 결정될 수 있다. A-스캔(702)의 주파수 측정들이 A-스캔(702)의 복합 구조물에서 재료 변화들이 발생했는지 여부를 결정하는데 사용된다. 일례로, A-스캔(702)의 주파수 측정들이 주파수 이미지를 형성하는데 사용된다.

[0109] 일부 예시적인 예들에서, A-스캔(702)의 주파수 측정들은 불일치들의 검출 가능성을 향상시키는데 사용된다. 예를 들어, A-스캔(702)의 주파수 측정들은 구조 신호의 스펙트럼 성분들을 예측하는데 사용된다. 다음에, 전체 대역폭 신호로부터 구조 신호의 스펙트럼 성분들이 제거되고, 주파수 도메인에서 보간이 수행된다. 일부 예시적인 예들에서는, 구조 신호의 스펙트럼 성분들의 보간 및 제거가 동시에 수행된다. 예를 들어, 보간은 구조 신호의 스펙트럼 성분들을 제거한다. 다른 예시적인 예들에서는, 보간 전에 구조 신호가 제거된다. 그 다음, 보간된 신호는 B-스캔을 형성하는데 사용된다.

[0110] 이제 도 8을 참조하면, 예시적인 실시예에 따라 B-스캔 이미지 및 주파수 이미지의 예시가 도시된다. 이미지

(800)는 도 2의 이미지(253)의 물리적 구현이다. 이미지(800)는 B-스캔 이미지(802) 및 주파수 이미지(804)를 포함한다. 주파수 이미지(804)는 도 2의 주파수 이미지(268)의 일례이다. B-스캔 이미지(802) 및 주파수 이미지(804)는 x축(806) 및 y축(808)을 갖는다. 도시된 바와 같이, x축(806)은 A-스캔 번호로 기술된 것과 같은 거리이다. y축(808)은 깊이이다.

[0111] 주파수 이미지(804)는 복합 구조물에 대한 주파수 측정들의 이미지이다. 이미지(800)에서 확인될 수 있는 바와 같이, 주파수 이미지(804)에서의 불일치들이 검출 가능성 향상시켰다.

[0112] 도 1 그리고 도 3 - 도 8에 도시된 서로 다른 컴포넌트들은 도 2의 컴포넌트들과 결합되거나, 도 2의 컴포넌트들에 사용되거나, 또는 이 둘의 결합일 수도 있다. 추가로, 도 1 그리고 도 3 - 도 8의 컴포넌트들 중 일부는 도 2에서 블록 형태로 도시된 컴포넌트들이 어떻게 물리적 구조물들로서 구현될 수 있는지에 관한 예시적인 예들일 수도 있다.

[0113] 이제 도 9를 참조하면, 예시적인 실시예에 따라 복합 구조물에서 재료 변화들을 검출하기 위한 프로세스의 흐름도의 예시가 도시된다. 도 9에 예시된 프로세스는 도 2의 레이저 초음파 검사 시스템(205)과 같은 초음파 검사 시스템에서 구현될 수도 있다.

[0114] 프로세스(900)는 펠스형 레이저 빔을 다수의 복합 재료들로 구성된 복합 구조물 쪽으로 향하게 함으로써 시작되며, 여기서는 복합 구조물에 의해 펠스형 레이저 빔의 방사선이 흡수될 때 복합 구조물에서 광대역 초음파 신호들이 형성된다(동작(902)). 그 다음, 프로세스(900)는 데이터를 형성하기 위해 광대역 초음파 신호들을 검출하며, 여기서 데이터는 다수의 초음파 A-스캔들을 포함한다(동작(904)). 일부 예시적인 예들에서, 광대역 초음파 신호들은 포인트형 광 검출기를 사용하여 검출된다. 일부 예들에서, 포인트형 광 검출기의 초음파는 광대역이다.

[0115] 프로세스(900)는 또한 다수의 초음파 A-스캔들 각각에 대한 복수의 주파수 측정들을 식별하도록 데이터를 처리한다(동작(906)). 일부 예들에서, 주파수 측정들은 평균 주파수들 또는 최대 주파수들 중 적어도 하나로부터 선택된다. 일부 예시적인 예들에서, 데이터를 처리하는 것은 다수의 초음파 A-스캔들 각각에 이동 윈도우를 적용하는 것 그리고 이동 윈도우 내에서 평균 주파수 또는 최대 주파수 중 적어도 하나를 결정하는 것을 포함한다. 일부 예시적인 예들에서, 이동 윈도우는 가우스 형상을 갖는다.

[0116] 한 예시적인 예에서, 데이터를 처리하는 것은 다음 식에 따라 다수의 초음파 A-스캔들 중 한 A-스캔의 윈도우형 신호의 최대 주파수를 결정하는 것을 포함한다:

$$S_n = \sum_{k=1}^p a_k * S_{n-k} \quad (5)$$

[0118] 이 식에서, p 는 계수들의 양이고, S_n 은 샘플 포인트 n 에서의 A-스캔 신호이다.

[0119] 다른 예시적인 예에서, 주파수 측정들을 식별하도록 데이터를 처리하는 것은 다음 식에 따라 다수의 초음파 A-스캔들 중 한 초음파 A-스캔의 윈도우형 신호의 복소 분석 표현의 자기 상관 함수 $\hat{R}(t)$ 를 사용하여 초음파 A-스캔의 윈도우형 신호의 평균 주파수를 결정하는 것을 포함하며:

$$f_{mean} = \frac{1}{2\pi i} \frac{\dot{R}(0)}{R(0)} = \frac{1}{2\pi} \dot{\phi}(0) \quad (6)$$

[0121] 여기서 $R(0)$ 은 0 시점에서의 복소 자기 상관 함수 $\hat{R}(t)$ 의 크기이고, $\phi(0)$ 은 0 시점에서의 복소 자기 상관 함수의 위상이다. 함수 위의 점은 해당 함수의 시간 미분을 나타낸다. A-스캔의 N-포인트 샘플링된 버전의 경우, 식(5)은 다음과 같이 되며:

$$f_{mean} = \tan^{-1} \left[\frac{im R_N(1)}{re R_N(1)} \right] \quad (7)$$

[0123] 여기서 $R_N(1)$ 은 샘플 포인트 1에서 평가된 N-포인트 복소 자기 상관 함수 R_N 이며, im 은 복소 자기 상관 함수의 허수부를 의미하고, re 는 복소 자기 상관 함수의 실수부를 의미한다.

[0124] 프로세스(900)는 추가로, 복수의 주파수 측정들을 사용하여 주파수 이미지를 디스플레이한다(동작(908)). 그

후에, 프로세스가 종료된다.

[0125] 주파수 이미지를 분석함으로써, 불일치들이 관찰될 수 있다. 예를 들어, 주파수 이미지를 분석함으로써, 재료 변화들이 관찰될 수 있다. 일부 예시적인 예들에서, 재료 변화들이 관찰된다면, 복합 구조물은 재작업되거나 교체될 수 있다.

[0126] 이제 도 10을 참조하면, 예시적인 실시예에 따라 불일치들의 검출을 개선하도록 데이터를 처리하기 위한 프로세스의 흐름도의 예시가 도시된다. 도 10에 예시된 프로세스는 도 2의 레이저 초음파 검사 시스템(205)과 같은 초음파 검사 시스템에서 구현될 수도 있다.

[0127] 프로세스(1000)는 펄스형 레이저 빔을 복수의 층들로 구성된 복합 구조물 쪽으로 향하게 함으로써 시작되며, 여기서는 복합 구조물에 의해 펄스형 레이저 빔의 방사선이 흡수될 때 복합 구조물에서 다수의 광대역 초음파 신호들이 형성된다(동작(1002)). 프로세스(1000)는 또한 데이터를 형성하기 위해 광대역 초음파 신호들을 검출하며, 여기서 데이터는 복합 구조물에 대한 복수의 초음파 A-스캔들을 포함한다(동작(1004)).

[0128] 프로세스(1000)는 원도우형 신호들을 형성하도록 복수의 A-스캔들 각각에 이동 원도우를 적용한다(동작(1006)). 프로세스(1000)는 복수의 초음파 A-스캔들 각각에 대한 원도우형 신호들 내에서 주파수 측정을 결정한다(동작(1008)). 일부 예시적인 예들에서, 주파수 측정은 평균 주파수 또는 최대 주파수로부터 선택된다.

[0129] 일부 예시적인 예들에서, 최대 주파수는 다음 식에 따라 결정된다:

$$S_n = \sum_{k=1}^p a_k * S_{n-k} \quad (8)$$

[0130] 이 식에서, p 는 계수들의 양이고, S_n 은 샘플 포인트 n 에서의 A-스캔 신호이다.

[0132] 일부 예시적인 예들에서, 평균 주파수는 식에 따라 A-스캔의 원도우형 신호의 복소 분석 표현의 자기 상관 함수 $\hat{R}(t)$ 를 사용하여 결정된다:

$$f_{mean} = \frac{1}{2\pi i R(0)} = \frac{1}{2\pi} \dot{\phi}(0) \quad (9)$$

[0134] 여기서 $R(0)$ 은 0 시점에서의 복소 자기 상관 함수 $\hat{R}(t)$ 의 크기이고, $\phi(0)$ 은 0 시점에서의 복소 자기 상관 함수의 위상이며, 함수 위의 점은 해당 함수의 시간 미분을 나타낸다. A-스캔의 N -포인트 샘플링된 베전의 경우, 식(7)은 다음과 같이 되며:

$$f_{mean} = \tan^{-1} \left[\frac{im R_N(1)}{re R_N(1)} \right] \quad (10)$$

[0136] 여기서 $R_N(1)$ 은 샘플 포인트 1에서 평가된 N -포인트 복소 자기 상관 함수 R_N 이며, im 은 복소 자기 상관 함수의 허수부를 의미하고, re 는 복소 자기 상관 함수의 실수부를 의미한다.

[0137] 프로세스(1000)는 또한 주파수 측정을 사용하여 복수의 초음파 A-스캔들 각각의 A-스캔 스펙트럼으로부터 구조 신호의 스펙트럼 성분들을 제거한다(동작(1010)). 프로세스(1000)는 보간된 A-스캔 스펙트럼 데이터를 형성하기 위해, 구조 신호의 스펙트럼 성분들을 제거한 후 복수의 초음파 A-스캔들 각각의 A-스캔 스펙트럼에 대해 보간을 수행한다(동작(1012)). 그 후에, 프로세스가 종료된다.

[0138] 이제 도 11을 참조하면, 예시적인 실시예에 따라 불일치들의 검출을 개선하도록 데이터를 처리하기 위한 프로세스의 흐름도의 예시가 도시된다. 도 11에 예시된 프로세스는 도 2의 레이저 초음파 검사 시스템(205)과 같은 초음파 검사 시스템에서 구현될 수도 있다.

[0139] 프로세스(1100)는 레이저 초음파 검사 시스템을 사용하여 복합 구조물에 대한 데이터를 획득함으로써 시작된다(동작(1102)). 일부 예시적인 예들에서, 복합 구조물은 복수의 층들을 갖는다.

[0140] 프로세스(1100)는 데이터에서 구조 신호의 스펙트럼 성분들의 폭 및 주파수를 결정한다(동작(1104)). 일부 예시적인 예들에서는, 다음 식을 사용하여 구조 신호의 스펙트럼 성분들의 주파수가 추정되며:

$$S_n = \sum_{k=1}^p a_k * S_{n-k} \quad (11)$$

[0142] 여기서 p 는 계수들의 양이고, S_n 은 샘플 포인트 n 에서의 A-스캔 신호이다.

[0143] 일부 예시적인 예들에서, 구조 신호의 스펙트럼 성분들의 주파수는 다음 식에 따라 초음파 A-스캔의 원도우형 신호의 복소 분석 표현의 자기 상관 함수 $\hat{R}(t)$ 를 사용하여 추정되며:

$$f_{mean} = \frac{1}{2\pi i} \frac{\dot{R}(0)}{R(0)} = \frac{1}{2\pi} \dot{\phi}(0) \quad (12)$$

[0144]

[0145] 여기서 $R(0)$ 은 0 시점에서의 복소 자기 상관 함수 $\hat{R}(t)$ 의 크기이고, $\dot{\phi}(0)$ 은 0 시점에서의 복소 자기 상관 함수의 위상이다. 함수 위의 점은 해당 함수의 시간 미분을 나타낸다. A-스캔의 N-포인트 샘플링된 베전의 경우, 식(9)은 다음과 같이 되며:

$$f_{mean} = \tan^{-1} \left[\frac{im R_N(1)}{re R_N(1)} \right] \quad (13)$$

[0146]

[0147] 여기서 $R_N(1)$ 은 샘플 포인트 1에서 평가된 N-포인트 복소 자기 상관 함수 R_N 이며, im 은 복소 자기 상관 함수의 허수부를 의미하고, re 는 복소 자기 상관 함수의 실수부를 의미한다.

[0148]

일부 예시적인 예들에서, 주파수 도메인에서 구조 신호 스펙트럼의 폭은 초음파 A-스캔의 원도우형 신호의 복소 분석 표현의 자기 상관 함수 $\hat{R}(t)$ 를 사용하여 추정된다. A-스캔의 N-포인트 샘플링된 베전의 경우, 폭 = $\frac{2}{N} \left[1 - \frac{|R_N(1)|}{|R_N(0)|} \right]$ 이고, 여기서 $|R_N(1)|$ 은 샘플 포인트 1에서 평가된 N-포인트 복소 자기 상관 함수 R_N 의 크기이고, $R_N(0)$ 은 샘플 포인트 0에서 평가된 N-포인트 복소 자기 상관 함수 R_N 이다.

[0149]

프로세스(1100)는 주파수 도메인에서 데이터로부터 구조 신호의 스펙트럼 성분들을 제거한다(동작(1106)). 프로세스(1100)는 보간된 데이터를 형성하기 위해, 구조 신호의 스펙트럼 성분들을 제거함으로써 공백으로 남겨진 A-스캔 스펙트럼의 영역을 채우도록 보간 루틴을 수행한다(동작(1108)). 프로세스(1100)는 구조 신호가 제거된, 처리된 A-스캔을 형성하기 위해, 보간된 데이터에 대해 푸리에 역변환을 수행한다(동작(1110)). 어떤 예시적인 예에서, 구조 신호가 제거된, 처리된 A-스캔은 또한 도 3의 무구조 신호(306)와 같은 무구조 신호로 지칭될 수도 있다. 그 후에, 프로세스가 종료된다.

[0150]

도시된 서로 다른 실시예들의 흐름도들 및 블록도들은 예시적인 실시예의 장치 및 방법들의 일부 가능한 구현들의 아키텍처, 기능 및 동작을 예시한다. 이와 관련하여, 흐름도들 또는 블록도들 내의 각각의 블록은 모듈, 세그먼트, 기능, 또는 동작이나 단계의 일부를 나타낼 수도 있다.

[0151]

예시적인 실시예의 일부 대안적인 구현들에서는, 블록들에서 언급된 기능 또는 기능들이 도면들에서 언급된 순서와 다르게 발생할 수도 있다. 예를 들어, 어떤 경우들에는, 연속하여 도시된 2개의 블록들이 실질적으로 동시에 실행될 수도 있고, 또는 블록들이 수반되는 기능에 따라 간혹 역순으로 수행될 수도 있다. 또한, 흐름도 또는 블록도에서 예시된 블록들 외에도 다른 블록들이 추가될 수도 있다.

[0152]

예를 들어, 프로세스(900)는 주파수 이미지를 분석함으로써 복합 구조물에 바람직하지 않은 상태들이 존재하는지 여부를 결정하는 것을 더 포함할 수 있다. 일부 예시적인 예들에서, 바람직하지 않은 상태들은 재료 변화들을 포함한다.

[0153]

추가 예에서, 프로세스(1000)는 복수의 초음파 A-스캔들 각각의 A-스캔 스펙트럼을 형성하도록 복수의 초음파 A-스캔들 각각을 푸리에 변환하는 것; 그리고 복수의 무구조 초음파 A-스캔들을 형성하도록 보간된 A-스캔 스펙트럼 데이터에 대해 푸리에 역변환을 수행하는 것을 더 포함한다. 프로세스(1000)는 복수의 무구조 초음파 A-스캔들로부터 형성된 무구조 B-스캔 이미지를 필터링하는 것을 더 포함할 수 있다. 일례로, 무구조 B-스캔 이미지를 필터링하는 것은 무구조 B-스캔 이미지에 대해 저역 통과 필터를 사용하는 것을 포함한다.

[0154]

다른 예에서, 프로세스(1100)는 A-스캔을 필터링하여 필터링된 데이터를 형성하는 것을 더 포함한다. 프로세스(1100)는 또한 필터링된 데이터를 B-스캔에 디스플레이하는 것을 포함할 수도 있다.

[0155]

이제 도 12를 참조하면, 예시적인 실시예에 따라 데이터 처리 시스템의 블록도 형태의 예시가 도시된다. 데이터 처리 시스템(1200)은 도 2의 컴퓨터 시스템(214)을 구현하는데 사용될 수 있다. 데이터 처리 시스템(1200)

은 도 3에서 설명한 바와 같이 데이터를 처리하여 도 4 - 도 8에 도시된 바와 같은 출력을 디스플레이하는데 사용될 수 있다. 도시된 바와 같이, 데이터 처리 시스템(1200)은 프로세서 유닛(1204), 저장 디바이스들(1206), 통신 유닛(1208), 입력/출력 유닛(1210) 그리고 디스플레이(1212) 간의 통신들을 제공하는 통신 프레임워크(1202)를 포함한다. 어떤 경우들에는, 통신 프레임워크(1202)가 버스 시스템으로서 구현될 수도 있다.

[0156] 프로세서 유닛(1204)은 소프트웨어가 다수의 동작들을 수행하기 위한 명령들을 실행하도록 구성된다. 프로세서 유닛(1204)은 구현에 따라, 다수의 프로세서들, 멀티-프로세서 코어, 및/또는 다른 어떤 타입의 프로세서를 포함할 수 있다. 어떤 경우들에는, 프로세서 유닛(1204)이 회로 시스템, 주문형 접착 회로(ASIC: application specific integrated circuit), 프로그래밍 가능 로직 디바이스, 또는 다른 어떤 적당한 타입의 하드웨어 유닛과 같은 하드웨어 유닛의 형태를 취할 수도 있다.

[0157] 프로세서 유닛(1204)에 의해 실행되는 운영 시스템, 애플리케이션들 및/또는 프로그램들에 대한 명령들은 저장 디바이스들(1206)에 로케이팅될 수 있다. 저장 디바이스들(1206)은 통신 프레임워크(1202)를 통해 프로세서 유닛(1204)과 통신할 수 있다. 본 명세서에서 사용되는 바와 같이, 컴퓨터 판독 가능 저장 디바이스로도 또한 지칭되는 저장 디바이스는 일시적 그리고/또는 영구적 기반으로 정보를 저장할 수 있는 하드웨어의 임의의 부분이다. 이 정보는 데이터, 프로그램 코드 및/또는 다른 정보를 포함할 수 있지만 이에 한정되는 것은 아니다.

[0158] 메모리(1214) 및 영구 저장소(1216)는 저장 디바이스들(1206)의 예들이다. 메모리(1214)는 예를 들어, 랜덤 액세스 메모리 또는 어떤 타입의 휘발성 또는 비휘발성 저장 디바이스의 형태를 취할 수도 있다. 영구 저장소(1216)는 임의의 수의 컴포넌트들 또는 디바이스들을 포함할 수도 있다. 예를 들어, 영구 저장소(1216)는 하드 드라이브, 플래시 메모리, 채기록 가능한 광 디스크, 채기록 가능한 자기 테이프, 또는 상기의 어떤 결합을 포함할 수 있다. 영구 저장소(1216)에 의해 사용되는 매체는 착탈식일 수도 또는 착탈식이 아닐 수도 있다.

[0159] 통신 유닛(1208)은 데이터 처리 시스템(1200)이 다른 데이터 처리 시스템들 및/또는 디바이스들과 통신할 수 있게 한다. 통신 유닛(1208)은 물리적 및/또는 무선 통신 링크들을 사용하여 통신들을 제공할 수 있다.

[0160] 입력/출력 유닛(1210)은 데이터 처리 시스템(1200)에 접속된 다른 디바이스들로부터 입력이 수신되고 그러한 다른 디바이스들로 출력이 전송되게 한다. 예를 들어, 입력/출력 유닛(1210)은 키보드, 마우스, 및/또는 다른 어떤 타입의 입력 디바이스를 통해 사용자 입력이 수신되게 할 수 있다. 다른 예로서, 입력/출력 유닛(1210)은 데이터 처리 시스템(1200)에 접속된 프린터로 출력이 전송되게 할 수 있다.

[0161] 디스플레이(1212)는 사용자에게 정보를 디스플레이하도록 구성된다. 디스플레이(1212)는 예를 들어, 제한 없이, 모니터, 터치 스크린, 레이저 디스플레이, 홀로그래픽 디스플레이, 가상 디스플레이 디바이스, 및/또는 다른 어떤 타입의 디스플레이 디바이스를 포함할 수도 있다.

[0162] 이 예시적인 예에서, 서로 다른 예시적인 실시예들의 프로세스들은 컴퓨터 구현 명령들을 사용하여 프로세서 유닛(1204)에 의해 수행될 수 있다. 이러한 명령들은 프로그램 코드, 컴퓨터 사용 가능 프로그램 코드 또는 컴퓨터 판독 가능 프로그램 코드로 지칭될 수 있으며, 프로세서 유닛(1204) 내의 하나 또는 그보다 많은 프로세서들에 의해 판독 및 실행될 수 있다.

[0163] 이러한 예들에서, 프로그램 코드(1218)는 선택적으로 착탈식인 컴퓨터 판독 가능 매체(1220) 상에 함수 형태로 로케이팅되며, 프로세서 유닛(1204)에 의한 실행을 위해 데이터 처리 시스템(1200)으로 로딩되거나 전송될 수도 있다. 프로그램 코드(1218)와 컴퓨터 판독 가능 매체(1220)가 함께 컴퓨터 프로그램 제품(1222)을 형성한다. 이 예시적인 예에서, 컴퓨터 판독 가능 매체(1220)는 컴퓨터 판독 가능 저장 매체(1224) 또는 컴퓨터 판독 가능 신호 매체(1226)일 수도 있다.

[0164] 컴퓨터 판독 가능 저장 매체(1224)는 프로그램 코드(1218)를 전파하거나 송신하는 매체라기보다는 프로그램 코드(1218)를 저장하는데 사용되는 물리적 또는 유형의 저장 디바이스이다. 컴퓨터 판독 가능 저장 매체(1224)는 예를 들어, 제한 없이, 데이터 처리 시스템(1200)에 접속되는 영구 저장 디바이스나 광 또는 자기 디스크일 수도 있다.

[0165] 대안으로, 프로그램 코드(1218)는 컴퓨터 판독 가능 신호 매체(1226)를 사용하여 데이터 처리 시스템(1200)으로 전송될 수 있다. 컴퓨터 판독 가능 신호 매체(1226)는 예를 들어, 프로그램 코드(1218)를 포함하는 전파 데이터 신호일 수도 있다. 이 데이터 신호는 전자기 신호, 광 신호, 및/또는 물리적 및/또는 무선 통신 링크들을 통해 송신될 수 있는 다른 어떤 타입의 신호일 수 있다.

[0166] 도 12의 데이터 처리 시스템(1200)의 예시는 예시적인 실시예들이 구현될 수 있는 방식에 대해 구성적인 제한들

을 제공하려는 것은 아니다. 서로 다른 예시적인 실시예들이 데이터 처리 시스템(1200)에 대해 예시된 것들에 추가로 또는 그 대신에 컴포넌트들을 포함하는 데이터 처리 시스템으로 구현될 수 있다. 또한, 도 12에 도시된 컴포넌트들은 도시된 예시적인 예들과 다를 수도 있다.

[0167] 본 개시의 예시적인 실시예들은 도 13에 도시된 것과 같은 항공기 제조 및 서비스 방법(1300) 그리고 도 14에 도시된 것과 같은 항공기(1400)와 관련하여 설명될 수 있다. 먼저 도 13을 참조하면, 예시적인 실시예에 따라 항공기 제조 및 서비스 방법의 예시가 도시된다. 예비 생산 동안, 항공기 제조 및 서비스 방법(1300)은 항공기(1400)의 규격 및 설계(1302) 그리고 자재 조달(1304)을 포함할 수 있다.

[0168] 생산 동안에는, 항공기(1400)의 컴포넌트 및 하위 부품 제조(1306) 그리고 시스템 통합(1308)이 이루어진다. 이후, 항공기(1400)는 운항(1312)되기 위해 인증 및 납품(1310)을 거칠 수 있다. 고객에 의한 운항(1312) 동안, 항공기(1400)는 정기 유지보수 및 서비스(1314)를 위해 스케줄링되는데, 이는 수정, 재구성, 개조 및 다른 유지보수 또는 서비스를 포함할 수도 있다.

[0169] 항공기 제조 및 서비스 방법(1300)의 프로세스들 각각은 시스템 통합자, 제3자 및/또는 오퍼레이터에 의해 수행 또는 실행될 수도 있다. 이러한 예들에서, 오퍼레이터는 고객일 수도 있다. 이러한 설명을 목적으로, 시스템 통합자는 임의의 수의 항공기 제작사들 및 레이저 시스템 하도급 업체들을 제한 없이 포함할 수도 있고; 제3자는 임의의 수의 판매사들, 하도급 업체들, 공급사들을 제한 없이 포함할 수도 있으며; 오퍼레이터는 항공사, 리스(leasing) 회사, 군사업체, 서비스 기관 등일 수도 있다.

[0170] 이제 도 14를 참조하면, 예시적인 실시예가 구현될 수 있는 항공기의 예시가 도시된다. 이 예에서, 항공기(1400)는 도 13의 항공기 제조 및 서비스 방법(1300)에 의해 생산되며, 복수의 시스템들(1404) 및 내부(1406)와 함께 기체(1402)를 포함할 수 있다. 복수의 시스템들(1404)의 예들은 추진 시스템(1408), 전기 시스템(1410), 유압 시스템(1412) 및 환경 시스템(1414) 중 하나 이상을 포함한다. 임의의 수의 다른 시스템이 포함될 수도 있다. 항공 우주 산업의 예가 도시되지만, 서로 다른 예시적인 실시예들은 자동차 산업과 같은 다른 산업들에 적용될 수도 있다.

[0171] 본 명세서에서 구현되는 장치들 및 방법들은 도 13의 항공기 제조 및 서비스 방법(1300)의 단계들 중 적어도 하나의 단계 동안 이용될 수도 있다. 도 13의 컴포넌트 및 하위 부품 제조(1306) 동안 하나 또는 그보다 많은 예시적인 실시예들이 사용될 수 있다. 예를 들어, 도 2의 레이저 초음파 검사 시스템(205)이 컴포넌트 및 하위 부품 제조(1306) 동안 복합 구조물들을 검사하는데 사용될 수 있다. 또한, 도 2의 레이저 초음파 검사 시스템(205)이 도 13의 유지보수 및 서비스(1314) 동안 조립체를 검사하는데 사용될 수 있다. 예를 들어, 항공기(1400)의 복합 구조물들이 레이저 초음파 검사 시스템(205)을 사용하여 항공기(1400)에 대해 스케줄링된 유지보수 동안 검사될 수 있다.

[0172] 따라서 하나 또는 그보다 많은 예시적인 실시예들은 복합 구조물에 불일치들이 존재하는지 여부를 결정하기 위한 방법 및 장치를 제공한다. 구조 신호가 식별된다. 구조 신호를 식별한 후, 구조 신호를 사용하여 B-스캔이 형성된다. B-스캔은 구조물의 주기성에 불일치들이 존재하는지 여부를 결정하도록 분석된다. 일부 예시적인 예들에서, 주파수 측정들에 의해 구조 신호가 예측된다. 일부 예들에서, 주파수 측정들은 주파수 이미지를 형성하는데 사용된다. 주파수 이미지는 구조물의 주기성에 불일치들이 존재하는지 여부를 결정하도록 분석된다. 예를 들어, 구조물의 주기성에서의 불일치들은 재료 변화들을 포함할 수 있다.

[0173] 다른 예에서, 구조 신호를 식별한 후, 구조 신호의 스펙트럼 성분들이 전체 대역폭 신호 스펙트럼으로부터 제거된다. 구조 신호의 스펙트럼 성분들을 제거함으로써 공백으로 남겨진 A-스캔 스펙트럼의 영역이 보간에 의해 채워진다. 푸리에 역변환 후 보간을 포함하는 신호는 B-스캔을 형성하는데 사용된다. B-스캔은 불일치들에 대한 검출 가능성을 향상시켰다.

[0174] 구조 신호를 결정함으로써, 예시적인 실시예들은 종래의 처리가 검출하지 않을 불일치들을 검출한다. 예를 들어, 예시적인 실시예들은 재료 변화들을 검출한다. 다른 예로서, 예시적인 실시예들은 구조 신호에 의해 이전에 마스킹된 불일치들을 검출한다.

[0175] 한 예시적인 예에서는, 복합 구조물에서 재료 변화들을 검출하는 방법이 제시된다. 펄스형 레이저 빔이 다수의 복합 재료들로 구성된 복합 구조물 쪽으로 향하게 된다. 복합 구조물에 의해 펄스형 레이저 빔의 방사선이 흡수될 때 복합 구조물에서 광대역 초음파 신호들이 형성된다. 데이터를 형성하도록 광대역 초음파 신호들이 검출된다. 데이터는 다수의 초음파 A-스캔들을 포함한다. 초음파 A-스캔들은 정규 복합 구조물 및 불일치들 모두에 대한 정보로 구성된다. 정규 복합 구조물은 제조 도중 개개의 층들의 설계된 포장과 관련된다. 불일치들

은 보이드들, 결함들, 인위적인 함유물들 또는 다른 타입들의 불일치들 중 적어도 하나를 포함한다. 원도우형 신호들을 형성하도록 복수의 초음파 A-스캔들 각각에 시간 도메인의 이동 원도우가 적용된다. 복수의 A-스캔들 각각에 대한 원도우형 신호들 내에서 주파수 측정이 결정된다. 원도우형 신호 각각에 대해 결정된 주파수 측정은 정규 복합 구조물을 기술하는 복수의 특성 주파수들을 형성한다. 복수의 주파수 측정들을 사용하여 특성 주파수들의 이미지가 디스플레이된다. 정규 재료 구조물의 변화들은 특성 주파수 이미지로 표현된다.

[0176] 다른 예시적인 실시예에서는, 방법이 제시된다. 펠스형 레이저 빔이 복수의 층들로 구성된 복합 구조물 쪽으로 향하게 된다. 복합 구조물에 의해 펠스형 레이저 빔의 방사선이 흡수될 때 복합 구조물에서 다수의 광대역 초음파 신호들이 형성된다. 데이터를 형성하도록 광대역 초음파 신호들이 검출된다. 데이터는 복합 구조물에 대한 복수의 초음파 A-스캔들을 포함한다. 복수의 초음파 A-스캔들에 대한 푸리에 스펙트럼이 계산된다. 전체 A-스캔 주파수 스펙트럼의 정규 재료 구조물을 특성화하는 주파수 피크가 복수의 초음파 A-스캔들에 대해 결정된다. 보간된 데이터를 형성하도록 푸리에 도메인에서 주파수 피크 주위의 신호 스펙트럼들의 보간을 사용하여 그리고 보간된 신호 스펙트럼들에 적용된 푸리에 역변환을 수행하여 복수의 초음파 A-스캔들 각각에 대한 전체 대역폭 신호 스펙트럼으로부터 구조 신호의 스펙트럼 성분들이 제거된다.

[0177] 서로 다른 예시적인 실시예들의 설명은 예시 및 설명을 목적으로 제시되었으며, 개시된 형태로 실시예들을 총망라하거나 이에 한정되도록 의도되는 것은 아니다. 많은 수정들 및 변형들이 해당 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자들에게 명백할 것이다. 추가로, 서로 다른 예시적인 실시예들은 다른 바람직한 실시예들과 비교할 때 다른 특징들을 제공할 수도 있다. 선택된 실시예 또는 실시예들은 실시예들의 원리들, 실제 적용을 가장 잘 설명하기 위해, 그리고 해당 기술분야에서 통상의 지식을 가진 다른 자들이 고려되는 특정 용도에 맞게 다양한 수정들을 갖는 다양한 실시예들에 대한 개시를 이해할 수 있게 하기 위해 선택되고 설명된다.

[0178] 추가로, 본 개시는 다음 조항들에 따른 실시예들을 포함한다:

[0179] 조항 1. 복합 구조물에서 재료 변화들을 검출하는 방법은: 펠스형 레이저 빔을 다수의 복합 재료들로 구성된 복합 구조물 쪽으로 향하게 하는 단계 – 복합 구조물에 의해 펠스형 레이저 빔의 방사선이 흡수될 때 복합 구조물에서 광대역 초음파 신호들이 형성됨 –; 데이터를 형성하기 위해 광대역 초음파 신호들을 검출하는 단계 – 데이터는 다수의 초음파 A-스캔들을 포함함 –; 다수의 초음파 A-스캔들 각각에 대한 복수의 주파수 측정들을 식별하도록 데이터를 처리하는 단계; 및 복수의 주파수 측정들을 사용하여 주파수 이미지를 디스플레이하는 단계를 포함하며, 여기서 재료 변화들은 주파수 이미지로 표현된다.

[0180] 조항 2. 조항 1의 방법에서, 데이터를 처리하는 단계는: 다수의 초음파 A-스캔들 각각에 이동 원도우를 적용하는 단계; 및 이동 원도우 내에서 평균 주파수 또는 최대 주파수 중 적어도 하나를 결정하는 단계를 포함한다.

[0181] 조항 3. 조항 2의 방법에서, 이동 원도우는 가우스 형상을 갖는다.

[0182] 조항 4. 조항 1, 조항 2 또는 조항 3의 방법은, 주파수 이미지를 분석함으로써 복합 구조물에 바람직하지 않은 상태들이 존재하는지 여부를 결정하는 단계를 더 포함하며, 여기서 바람직하지 않은 상태들은 재료 변화들을 포함한다.

[0183] 조항 5. 조항 1, 조항 2 또는 조항 3의 방법에서, 복수의 주파수 측정들은 평균 주파수들 또는 최대 주파수들 중 적어도 하나로부터 선택된다.

[0184] 조항 6. 조항 1, 조항 2 또는 조항 3의 방법에서, 데이터를 처리하는 단계는: 식 $S_n = \sum_{k=1}^p a_k * S_{n-k}$ 를 사용하여 다수의 초음파 A-스캔들 중 한 A-스캔의 원도우형 신호의 최대 주파수를 결정하는 단계를 포함하고, 여기서 p는 계수들의 양이고, S_n 은 샘플 포인트 n에서의 A-스캔 신호이다.

[0185] 조항 7. 조항 1, 조항 2 또는 조항 3의 방법에서, 복수의 주파수 측정들을 식별하도록 데이터를 처리하는 단계

는 식 $f_{mean} = \frac{1}{2\pi i} \frac{\hat{R}(0)}{R(0)} = \frac{1}{2\pi} \hat{\phi}(0)$ – $R(0)$ 은 0 시점에서의 복소 자기 상관 함수 (t)의 크기이고, $\hat{\phi}(0)$ 은 0 시점에서의 복소 자기 상관 함수의 위상이며, 함수 위의 점은 해당 함수의 시간 미분을 나타냄 – 또는 A-스캔

의 N-포인트 샘플링된 베전의 경우, 식 $f_{mean} = \tan^{-1} \frac{im R_N(1)}{re R_N(1)}$ – $R_N(1)$ 은 샘플 포인트 1에서 평가된 N-포인트 복소 자기 상관 함수 R_N 이며, im 은 복소 자기 상관 함수의 헤수부를 의미하고, re 는 복소 자기 상관 함수의

실수부를 의미함 – 중 적어도 하나에 따라 다수의 초음파 A-스캔들 중 한 초음파 A-스캔의 원도우형 신호의 복소 분석 표현의 자기 상관 함수 $\hat{R}(t)$ 를 사용하여 초음파 A-스캔의 원도우형 신호의 평균 주파수를 결정하는 단계를 포함한다.

[0186] 조항 8. 조항 1, 조항 2 또는 조항 3의 방법에서, 광대역 초음파 신호들은 포인트형 광 검출기를 사용하여 검출된다.

[0187] 조항 9. 방법은, 펠스형 레이저 빔을 복수의 총들로 구성된 복합 구조물 쪽으로 향하게 하는 단계 – 복합 구조물에 의해 펠스형 레이저 빔의 방사선이 흡수될 때 복합 구조물에서 다수의 광대역 초음파 신호들이 형성됨 –; 데이터를 형성하기 위해 광대역 초음파 신호들을 검출하는 단계 – 데이터는 복합 구조물에 대한 복수의 초음파 A-스캔들을 포함함 –; 원도우형 신호들을 형성하도록 복수의 초음파 A-스캔들 각각에 이동 원도우를 적용하는 단계; 복수의 초음파 A-스캔들 각각에 대한 원도우형 신호들 내에서 주파수 측정을 결정하는 단계; 주파수 측정을 사용하여 복수의 초음파 A-스캔들 각각의 A-스캔 스펙트럼으로부터 구조 신호의 스펙트럼 성분들을 제거하는 단계; 및 보간된 A-스캔 스펙트럼 데이터를 형성하기 위해, 구조 신호의 스펙트럼 성분들을 제거한 후 복수의 초음파 A-스캔들 각각의 A-스캔 스펙트럼에 대해 보간을 수행하는 단계를 포함한다.

[0188] 조항 10. 조항 9의 방법은, 복수의 초음파 A-스캔들 각각의 A-스캔 스펙트럼을 형성하도록 복수의 초음파 A-스캔들 각각을 푸리에 변환하는 단계; 및 복수의 무구조 초음파 A-스캔들을 형성하도록 보간된 A-스캔 스펙트럼 데이터에 대해 푸리에 역변환을 수행하는 단계를 더 포함한다.

[0189] 조항 11. 조항 10의 방법은, 복수의 무구조 초음파 A-스캔들로부터 형성된 무구조 B-스캔 이미지를 필터링하는 단계를 더 포함한다.

[0190] 조항 12. 조항 11의 방법에서, 무구조 B-스캔 이미지를 필터링하는 단계는 무구조 B-스캔 이미지에 대해 저역 통과 필터를 사용하는 단계를 포함한다.

[0191] 조항 13. 조항 9의 방법에서, 주파수 측정은 평균 주파수 또는 최대 주파수로부터 선택된다.

$$f_{mean} = \frac{1}{2\pi i} \frac{\hat{R}(0)}{R(0)} = \frac{1}{2\pi} \dot{\phi}(0)$$

[0192] 조항 14. 조항 13의 방법에서, 식
 $\hat{R}(t)$ 의 크기이고, $\phi(0)$ 은 0 시점에서의 복소 자기 상관 함수의 위상이며, 함수 위의 점은 해당 함수의 시간 미분을 나타냄 – 또는 A-스캔의 N-포인트 샘플링된 범위의 경우, 식
 $f_{mean} = \tan^{-1} \left[\frac{im R_N(1)}{re R_N(1)} \right]$ – $R_N(1)$ 은 샘플 포인트 1에서 평가된 N-포인트 복소 자기 상관 함수 R_N 이며, im은 복소 자기 상관 함수의 헤수부를 의미하고, re는 복소 자기 상관 함수의 실수부를 의미함 – 중 적어도 하나에 따라 초음파 A-스캔의 원도우형 신호의 복소 분석 표현의 자기 상관 함수 $\hat{R}(t)$ 를 사용하여 평균 주파수가 결정된다.

[0193] 조항 15. 조항 13의 방법에서, 최대 주파수는 식 $S_n = \sum_{k=1}^p a_k * S_{n-k}$ 를 사용하여 결정되고, 여기서 p는 계수들의 양이고, S_n 은 샘플 포인트 n에서의 A-스캔 신호이다.

[0194] 조항 16. 방법은, 레이저 초음파 검사 시스템을 사용하여 복합 구조물에 대한 데이터를 획득하는 단계; 데이터에서 구조 신호의 스펙트럼 성분들의 폭 및 주파수를 결정하는 단계; 주파수 도메인에서 데이터로부터 구조 신호의 스펙트럼 성분들을 제거하는 단계; 보간된 데이터를 형성하기 위해, 구조 신호의 스펙트럼 성분들을 제거함으로써 공백으로 남겨진 A-스캔 스펙트럼의 영역을 채우도록 보간 루틴을 수행하는 단계; 및 구조 신호가 제거된, 처리된 A-스캔을 형성하기 위해, 보간된 데이터에 대해 푸리에 역변환을 수행하는 단계를 포함한다.

[0195] 조항 17. 조항 16의 방법은, 필터링된 데이터를 형성하도록, 처리된 A-스캔을 필터링하는 단계; 및 필터링된 데이터를 무구조 B-스캔 이미지로 디스플레이하는 단계를 더 포함한다.

[0196] 조항 18. 조항 16 또는 조항 17의 방법에서, 구조 신호의 스펙트럼 성분들의 주파수는 식
 $S_n = \sum_{k=1}^p a_k * S_{n-k}$ 를 사용하여 추정되고, 여기서 p는 계수들의 양이고, S_n 은 샘플 포인트 n에서의 A-스캔 신호이다.

[0197] 조항 19. 조항 16 또는 조항 17의 방법에서, 식

$$f_{mean} = \frac{1}{2\pi i} \frac{\dot{R}(0)}{R(0)} = \frac{1}{2\pi} \dot{\phi}(0)$$

– $R(0)$ 은 0 시점에서의 복

소 자기 상관 함수 $\hat{R}(t)$ 의 크기이고, $\phi(0)$ 은 0 시점에서의 복소 자기 상관 함수의 위상이며, 함수 위의 점은 해당 함수의 시간 미분을 나타냄 – 또는 A-스캔의 N-포인트 샘플링된 버전의 경우, 식

$$f_{mean} = \tan^{-1} \left[\frac{im R_N(1)}{re R_N(1)} \right]$$

– $R_N(1)$ 은 샘플 포인트 1에서 평가된 N-포인트 복소 자기 상관 함수 R_N 이며, im 은 복

소 자기 상관 함수의 허수부를 의미하고, re 는 복소 자기 상관 함수의 실수부를 의미함 – 중 적어도 하나에 따라 초음파 A-스캔의 원도우형 신호의 복소 분석 표현의 자기 상관 함수 $\hat{R}(t)$ 를 사용하여 구조 신호의 스펙트럼 성분들의 주파수가 추정된다.

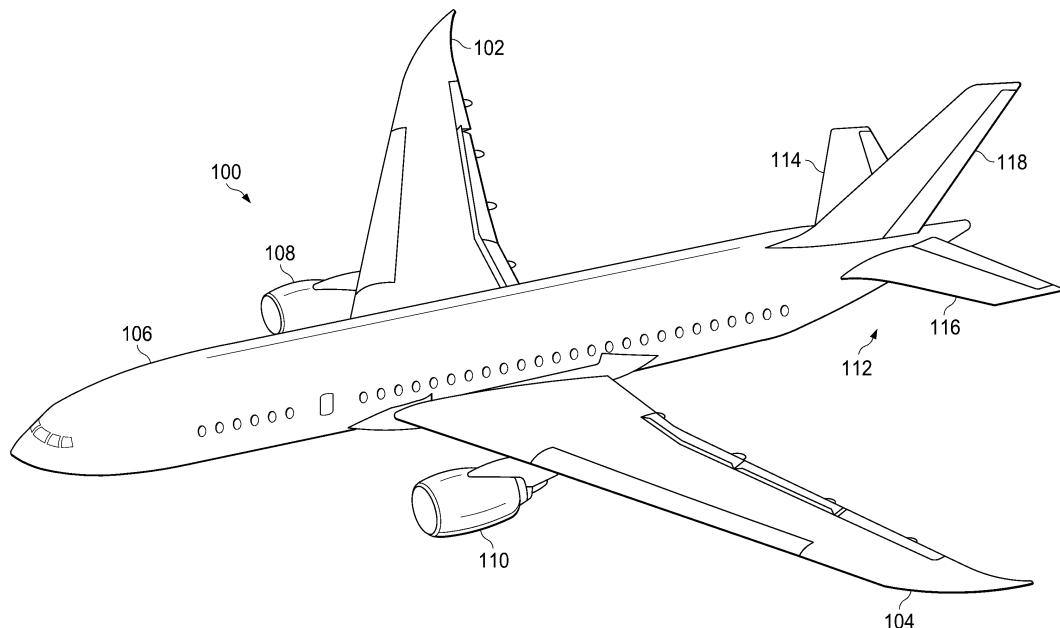
[0198] 조항 20. 조항 16 또는 조항 17의 방법에서, 구조 신호와 연관된 스펙트럼 성분들의 폭은 주파수 도메인에서 평균 주파수 $\pm (2 \times (\text{구조 신호 스펙트럼의 폭}))$ 이다.

[0199] 조항 21. 조항 20의 방법에서, 주파수 도메인에서의 구조 신호 스펙트럼의 폭은 초음파 A-스캔의 원도우 형 신호의 복소 분석 표현의 자기 상관 함수 $\hat{R}(t)$ 를 사용하여 추정되고, A-스캔의 N-포인트 샘플링된 버전의 경

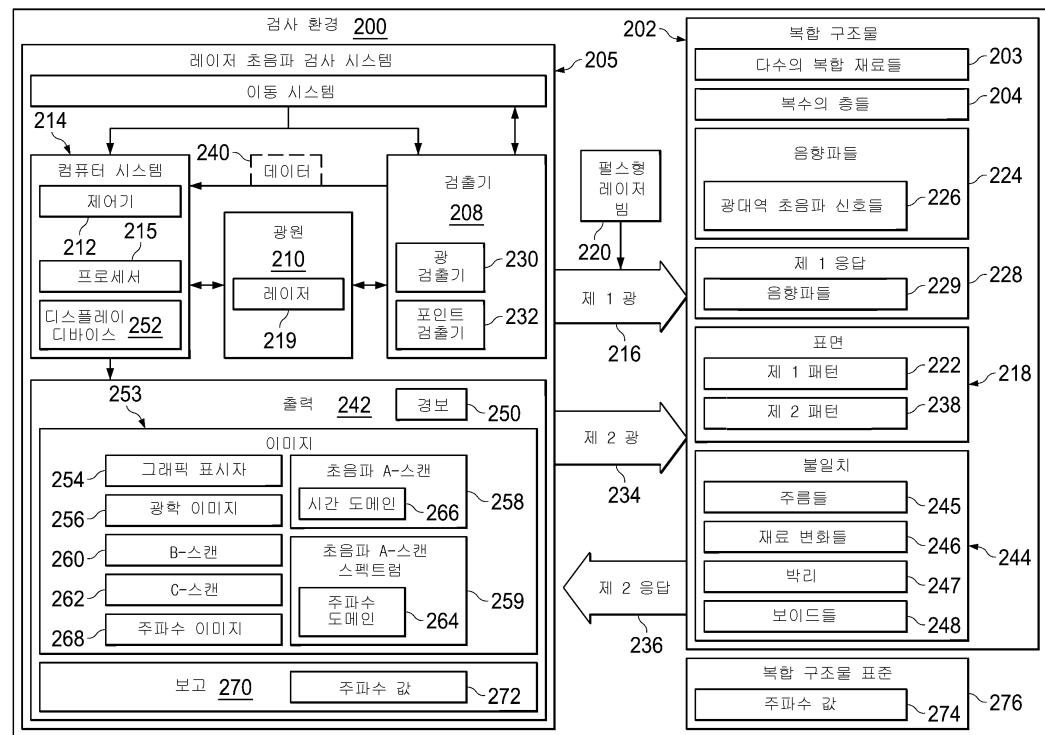
우, $\frac{2}{N} \left[1 - \frac{|R_N(1)|}{R_N(0)} \right]$ 이며, 여기서 $|R_N(1)|$ 은 샘플 포인트 1에서 평가된 N-포인트 복소 자기 상관 함수 R_N 의 크기이고, $R_N(0)$ 은 샘플 포인트 0에서 평가된 N-포인트 복소 자기 상관 함수 R_N 이다.

도면

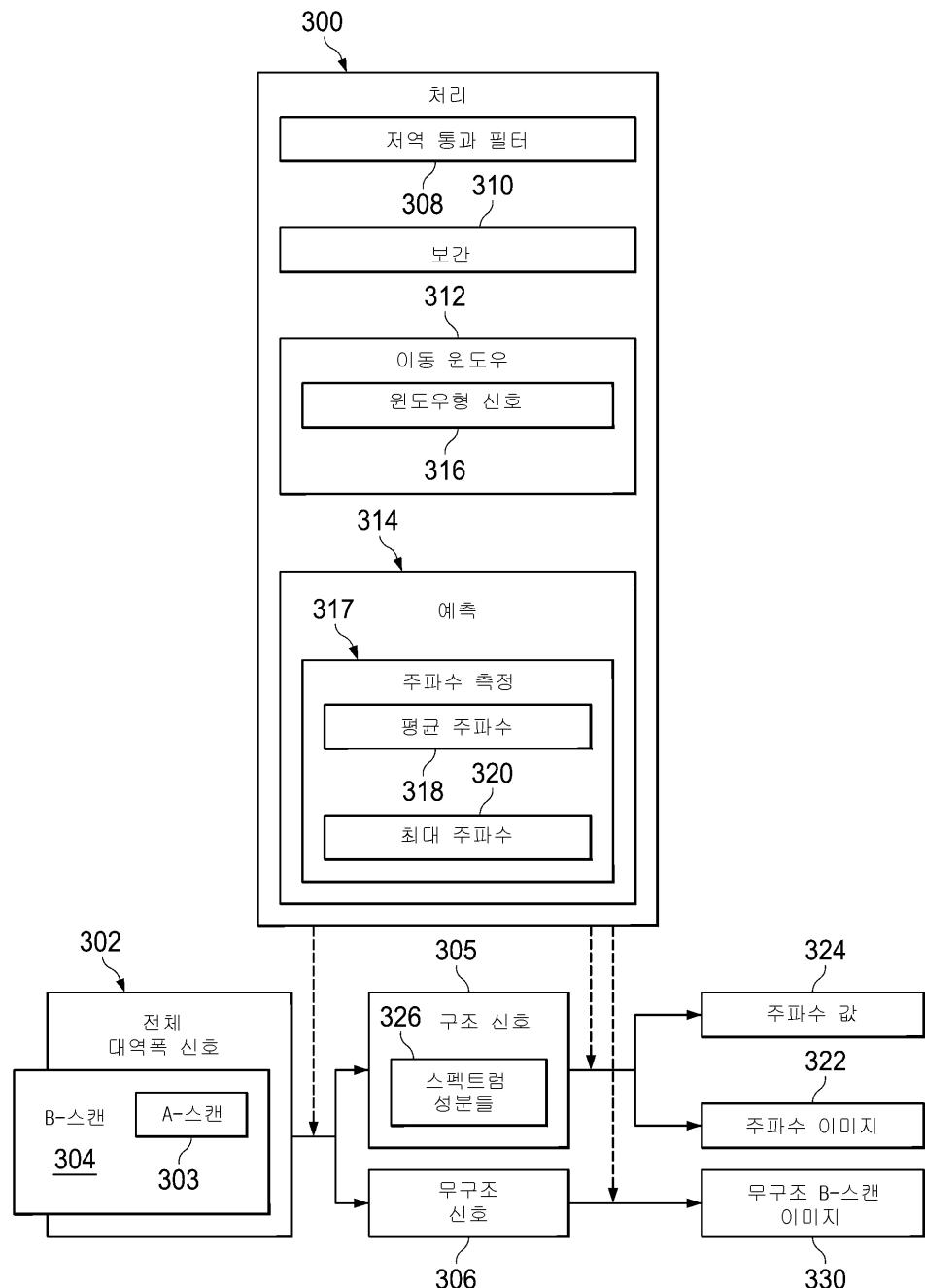
도면1



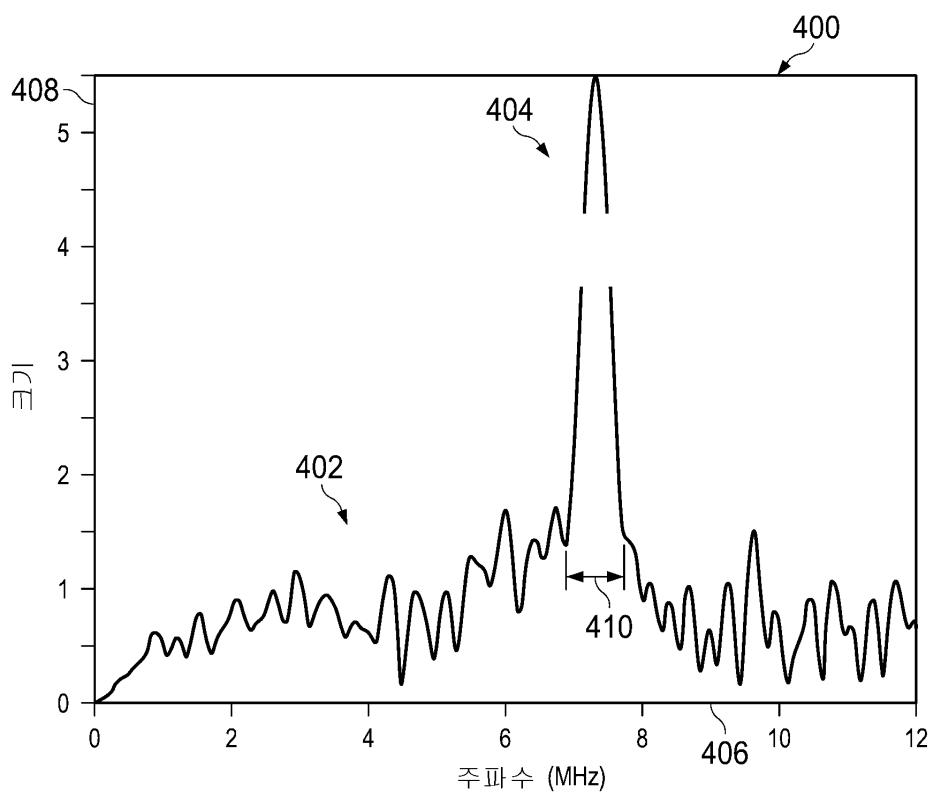
도면2



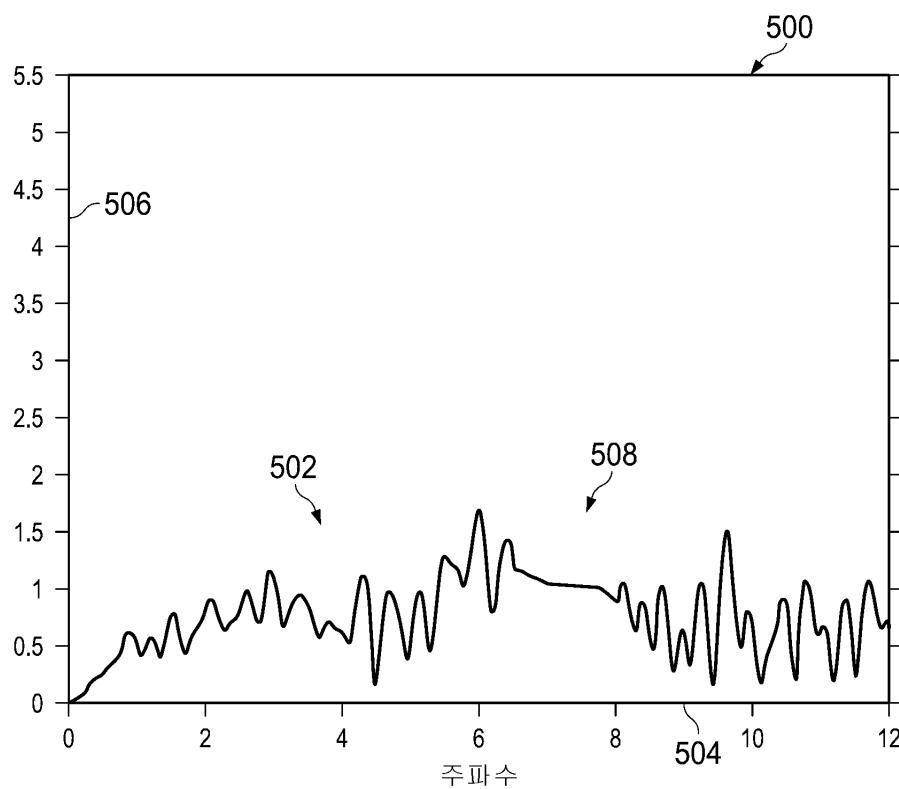
도면3



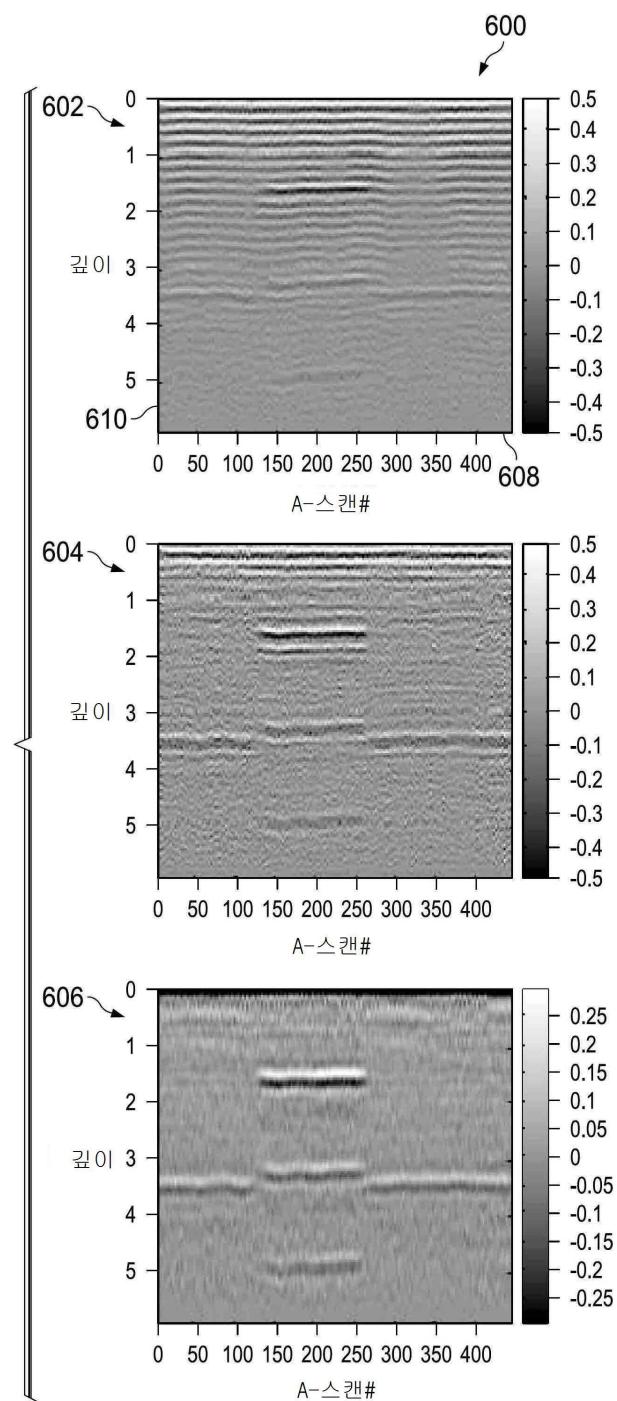
도면4



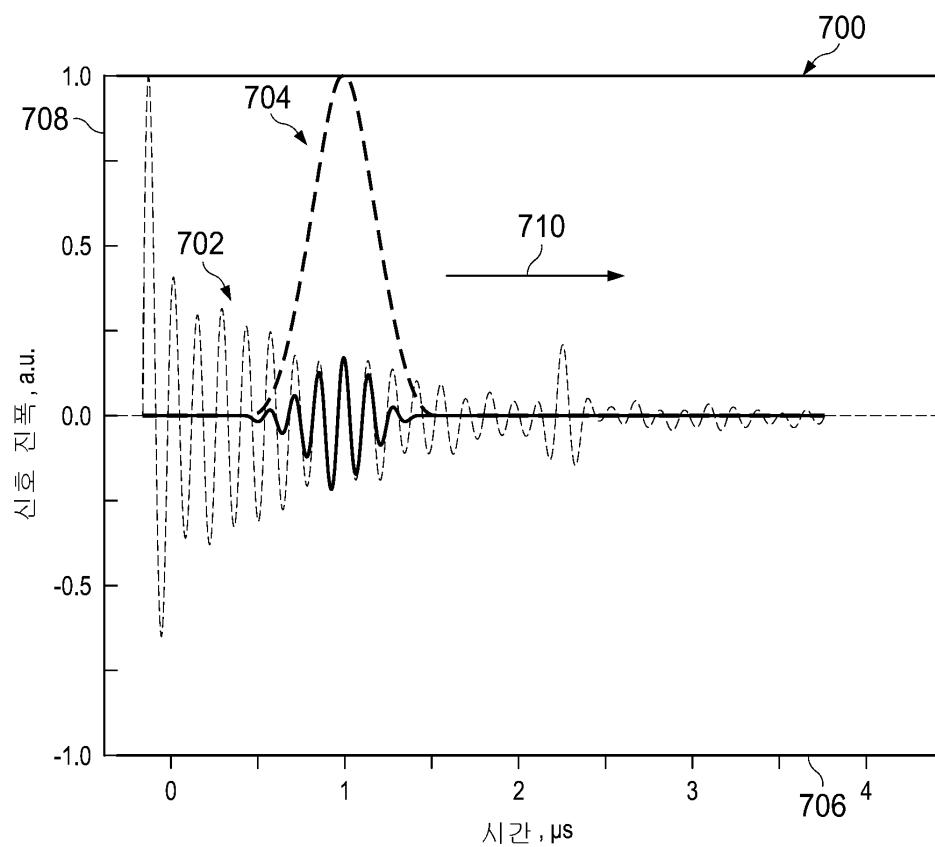
도면5



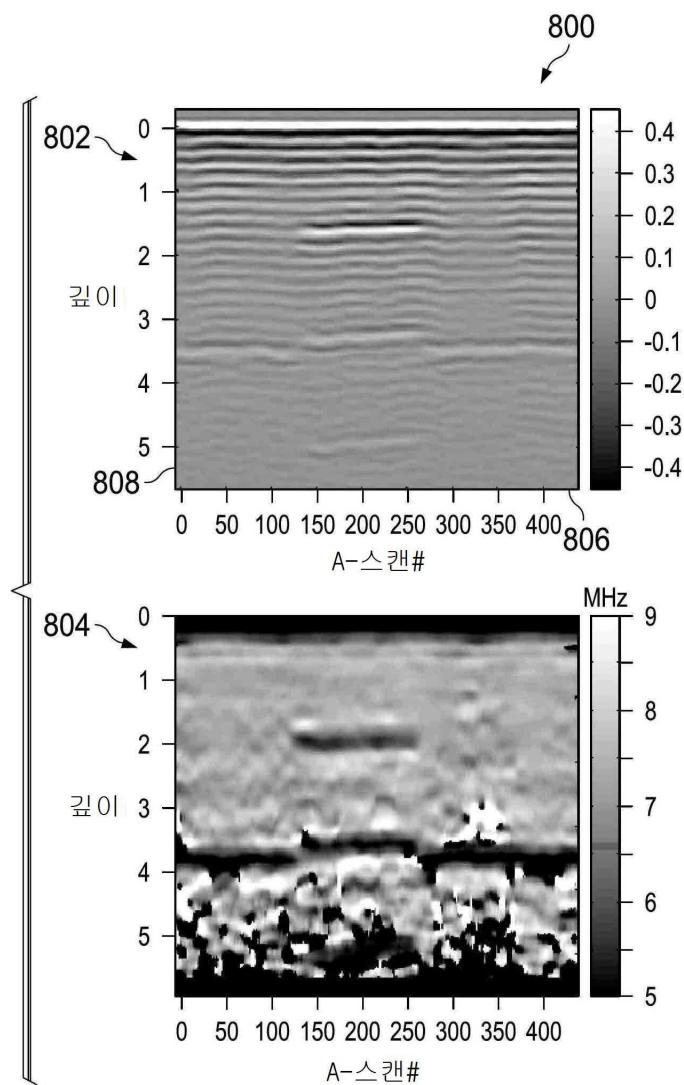
도면6



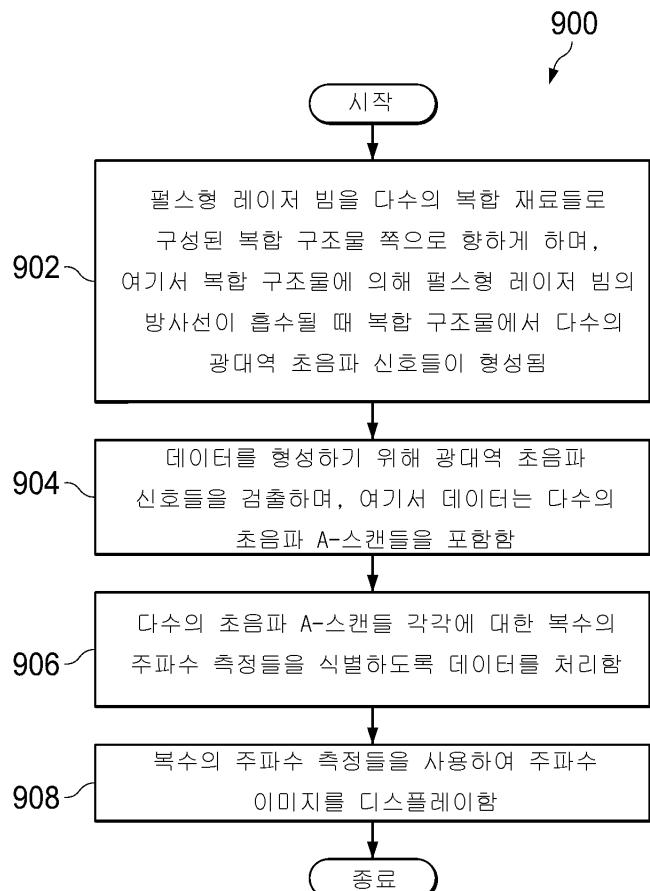
도면7



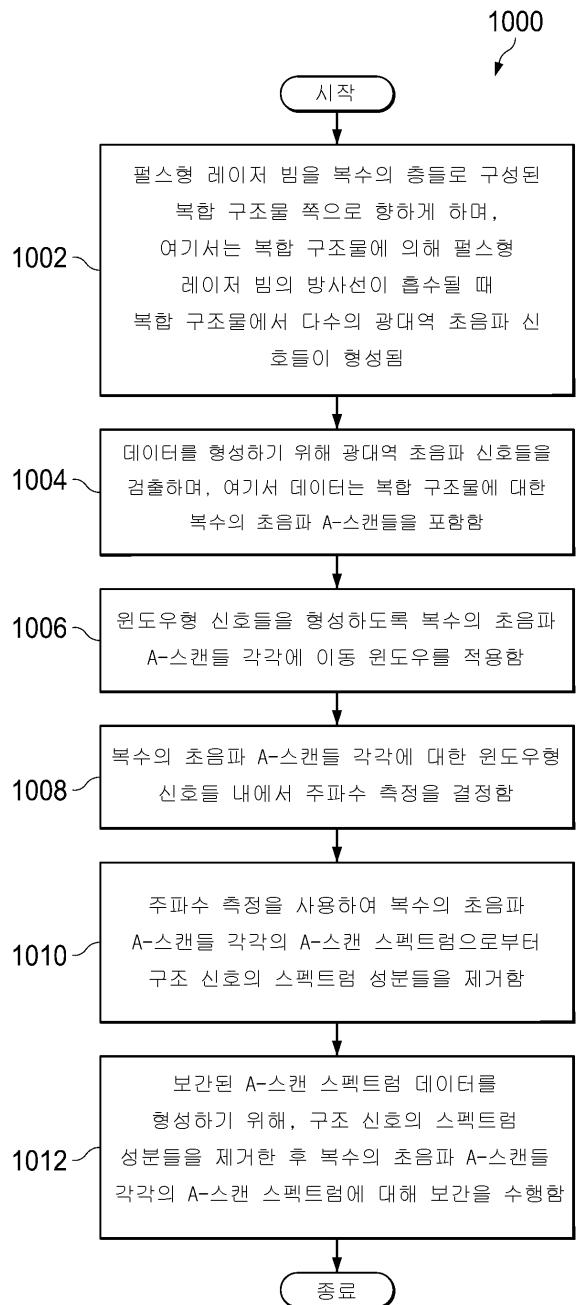
도면8



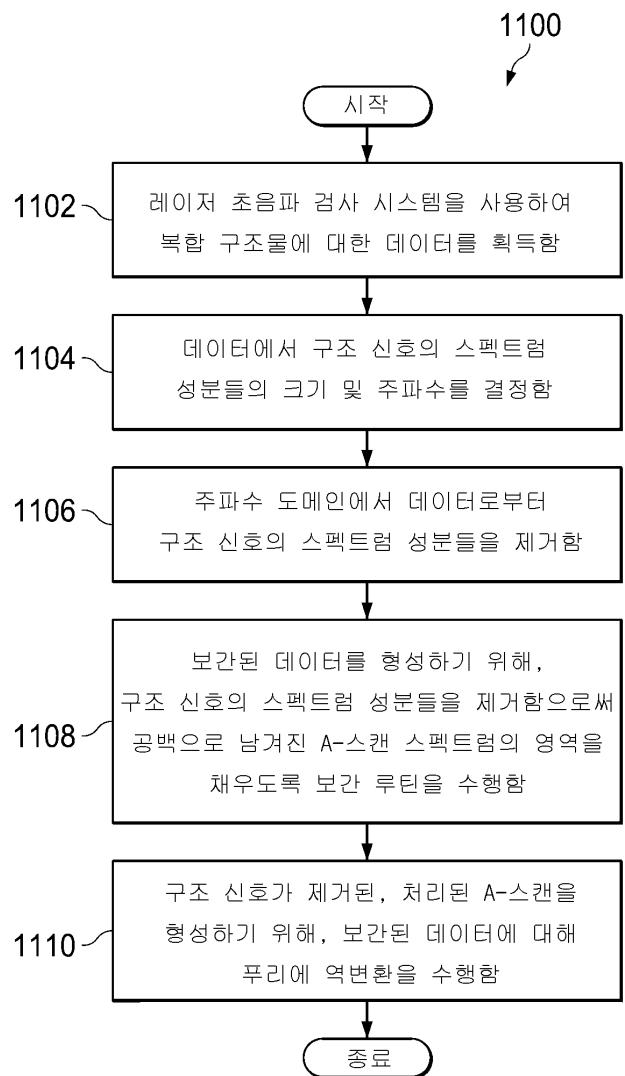
도면9



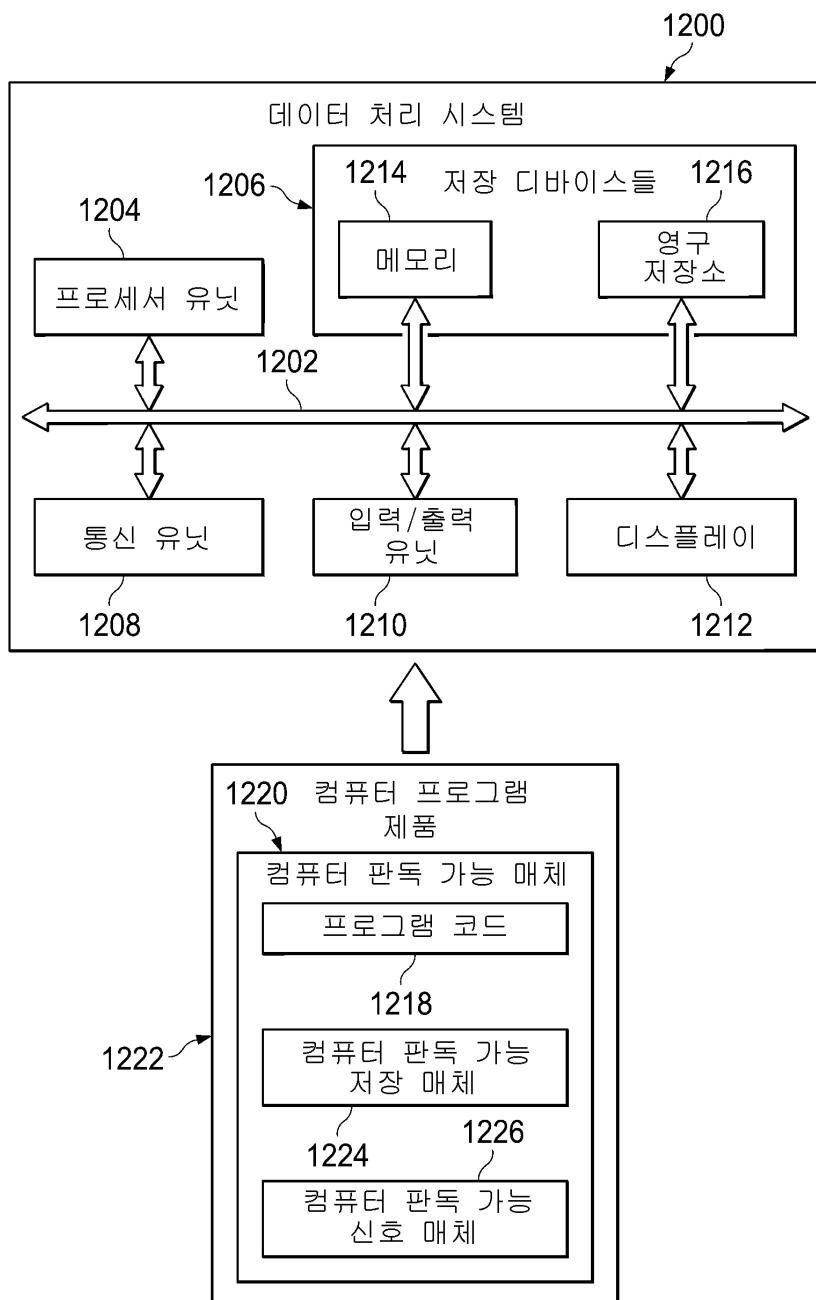
도면10



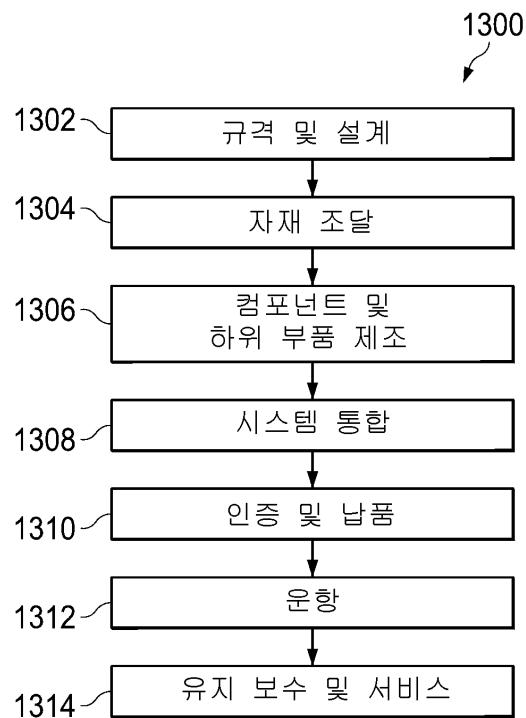
도면11



도면12



도면13



도면14

