



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2020-0127705
(43) 공개일자 2020년11월11일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01N 29/04 (2006.01) G01N 29/24 (2006.01)
G01N 29/44 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01N 29/043 (2013.01)
G01N 29/2437 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2019-0052359
(22) 출원일자 2019년05월03일
심사청구일자 2019년05월07일

(71) 출원인
연세대학교 산학협력단
서울특별시 서대문구 연세로 50 (신촌동, 연세대학교)
(72) 발명자
신용준
서울특별시 서대문구 연세로 50, 제3공학관 511호
방수식
서울특별시 서대문구 연세로 50, 제2공학관 729호
이영호
서울특별시 서대문구 연세로 50, 제2공학관 729호
(74) 대리인
오위환, 나성곤, 정기택

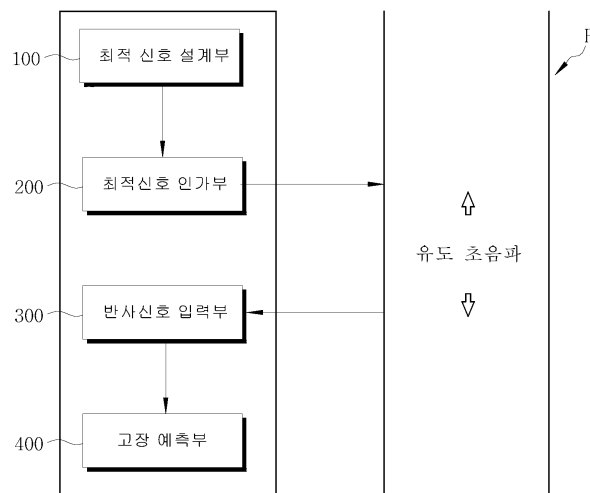
전체 청구항 수 : 총 16 항

(54) 발명의 명칭 배관 고장 예측 장치 및 방법

(57) 요약

본 발명은 진단대상 배관의 특성을 고려하여 유도 초음파 최적신호를 설계하고, 설계된 최적신호를 진단대상 배관에 인가하여 유도 초음파를 진단대상 배관의 길이방향으로 발생시키고, 인가된 최적신호가 진단대상 배관의 임의의 지점으로부터 반사되어 생성된 적어도 하나 이상의 반사신호를 입력받고, 입력받은 적어도 하나 이상의 반사신호에 기초하여 진단대상 배관의 고장위치 및 고장정도를 예측할 수 있다. 이를 통해 본 발명은 배관 내부 물질과 상관없이 높은 정확도로 배관의 고장을 진단할 수 있는 효과를 가진다. 또한, 배관의 길이 방향뿐만 아니라, 원주 방향에 있어서도 고장 위치를 진단할 수 있는 효과를 가진다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

G01N 29/4445 (2013.01)

G01N 2291/023 (2013.01)

G01N 2291/265 (2013.01)

명세서

청구범위

청구항 1

진단대상 배관의 특성을 고려하여 유도 초음파 최적신호를 설계하는 최적신호 설계부;

상기 최적신호 설계부로부터 설계된 최적신호를 상기 진단대상 배관에 인가하여 유도 초음파를 상기 진단대상 배관의 길이방향으로 발생시키는 최적신호 인가부;

상기 최적신호 인가부로부터 인가된 최적신호가 상기 진단대상 배관의 임의의 지점으로부터 반사되어 생성된 적어도 하나 이상의 반사신호를 입력받는 반사신호 입력부;

상기 반사신호 입력부로부터 입력받은 적어도 하나 이상의 반사신호에 기초하여 상기 진단대상 배관의 고장위치 및 고장정도를 예측하는 고장예측부;를 포함하는 배관 고장 예측 장치.

청구항 2

제 1 항에 있어서, 상기 최적신호 인가부는,

상기 진단대상 배관 외측 표면의 원주 방향을 따라 소정의 간격으로 부착되는 복수 개의 전단형(Shear) 압전소자 센서 모듈을 포함하여, 원주방향에서의 고장위치를 예측하는 배관 고장 예측 장치.

청구항 3

제 1 항에 있어서, 상기 최적신호 설계부는,

비틀림 모드(T mode: Torsional mode)의 유도 초음파 최적신호를 설계하는 배관 고장 예측 장치.

청구항 4

제 1 항에 있어서, 상기 고장예측부는,

상기 반사신호 입력부로부터 입력받은 적어도 하나 이상의 반사신호를 시간-주파수 영역으로 변환하는 시간-주파수 변환부; 및

상기 시간-주파수 변환부로부터 변환된 시간-주파수 영역을 상호상관함수로 분석하여 상기 진단대상 배관의 고장위치 및 고장정도를 예측하는 고장위치 및 고장정도 예측부;를 포함하는 배관 고장 예측 장치.

청구항 5

제 1 항에 있어서, 상기 최적신호 설계부는,

상기 진단대상 배관의 특성인 규격에 따라 주파수 폭 값(BW)을 산출하는 주파수 폭 값 산출부;

상기 주파수 폭 값 산출부로부터 산출된 주파수 폭 값(BW)을 기초로 지속시간 값(TD)을 산출하는 지속시간 값 산출부; 및

상기 주파수 폭 값 산출부로부터 산출된 주파수 폭 값(BW) 및 상기 지속시간 값 산출부로부터 산출된 지속시간 값(TD)을 기초로 중심주파수 값(CF)을 산출하는 중심주파수 값 산출부;를 포함하는 배관 고장 예측 장치.

청구항 6

제 5 항에 있어서, 상기 주파수 폭 값(BW)은,

다음 수식 1-1, 수식 1-2로 표현되는 주파수 폭 값(BW) 산출식을 이용하여 상기 진단대상 배관의 규격인 길이에 따른 주파수 폭 값(BW)을 산출하는 배관 고장 예측 장치.

<수식 1-1>

$$BW = \frac{9 \cdot \text{전파속도} \cdot 100}{2 \cdot \pi \cdot a \cdot L} \text{ [Hz]}$$

(BW(Hz): 주파수 폭의 값, a(%): 진단대상 배관의 길이 대비 원하는 분해능, L(m): 진단대상 배관의 길이)

<수식 1-2>

$$\text{전파속도} = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}} \text{ [m/s]}$$

(E: 진단대상 배관 재료의 탄성계수(Young's modulus), ν : 진단대상 배관 재료의 포아송 비(Poisson's ratio), ρ : 진단대상 배관 재료의 질량 밀도(mass density))

청구항 7

제 5 항에 있어서, 상기 지속시간 값(TD)은,

다음 수식 2로 표현되는 지속시간 값(TD) 산출식을 이용하여 상기 진단대상 배관의 분해능 성능에 따른 지속시간 값(TD)을 산출하는 배관 고장 예측 장치.

<수식 2>

$$0.5 < \sqrt{BW * TD} < 1.5$$

(BW(Hz): 주파수 폭의 값, TD(sec) 지속시간 값)

청구항 8

제 5 항에 있어서, 상기 중심주파수 값(CF)은,

상기 산출된 주파수 폭의 값(BW) 및 지속시간 값(TD)을 기준으로 기 설정된 중심주파수 범위로부터 최종 중심주파수 값(CF)을 도출하는 배관 고장 예측 장치.

청구항 9

최적신호 설계부에서 진단대상 배관의 특성을 고려하여 유도 초음파 최적신호를 설계하는 최적신호 설계단계;

최적신호 인가부에서 상기 최적신호 설계단계로부터 설계된 최적신호를 상기 진단대상 배관에 인가하여 유도 초음파를 상기 진단대상 배관의 길이방향으로 발생시키는 최적신호 인가단계;

반사신호 입력부에서 상기 최적신호 인가단계로부터 인가된 최적신호가 상기 진단대상 배관의 임의의 지점으로 부터 반사되어 생성된 적어도 하나 이상의 반사신호를 입력받는 반사신호 입력단계;

고장예측부에서 상기 반사신호 입력단계로부터 입력받은 적어도 하나 이상의 반사신호에 기초하여 상기 진단대상 배관의 고장위치 및 고장정도를 예측하는 고장예측단계;를 포함하는 배관 고장 예측 방법.

청구항 10

제 9 항에 있어서, 상기 최적신호 인가단계는,

상기 진단대상 배관 외측 표면의 원주 방향을 따라 소정의 간격으로 부착되는 복수 개의 전단형(Shear) 압전소자 센서 모듈을 통해, 원주방향에서의 고장위치를 예측하는 배관 고장 예측 방법.

청구항 11

제 9 항에 있어서, 상기 최적신호 설계단계는,

비틀림 모드(T mode: Torsional mode)의 유도 초음파 최적신호를 설계하는 배관 고장 예측 방법.

청구항 12

제 9 항에 있어서, 상기 고장예측단계는,

시간-주파수 변환부에서 상기 반사신호 입력단계로부터 입력받은 적어도 하나 이상의 반사신호를 시간-주파수 영역으로 변환하는 시간-주파수 변환단계; 및

고장위치 및 고장정도 예측부에서 상기 시간-주파수 변환단계로부터 변환된 시간-주파수 영역을 상호상관함수로 분석하여 상기 진단대상 배관의 고장위치 및 고장정도를 예측하는 고장위치 및 고장정도 예측단계;를 포함하는 배관 고장 예측 방법.

청구항 13

제 9 항에 있어서, 상기 최적신호 설계단계는,

주파수 폭 값 산출부에서 상기 진단대상 배관의 특성인 규격에 따라 주파수 폭 값(BW)을 산출하는 주파수 폭 값 산출단계;

지속시간 값 산출부에서 상기 주파수 폭 값 산출단계로부터 산출된 주파수 폭 값(BW)을 기초로 지속시간 값(TD)을 산출하는 지속시간 값 산출단계; 및

중심주파수 값 산출부에서 상기 주파수 폭 값 산출단계로부터 산출된 주파수 폭 값(BW) 및 상기 지속시간 값 산출단계로부터 산출된 지속시간 값(TD)을 기초로 중심주파수 값(CF)을 산출하는 중심주파수 값 산출단계;를 포함하는 배관 고장 예측 방법.

청구항 14

제 13 항에 있어서, 상기 주파수 폭 값(BW)은,

다음 수식 1-1, 수식 1-2로 표현되는 주파수 폭 값(BW) 산출식을 이용하여 상기 진단대상 배관의 규격인 길이에 따른 주파수 폭 값(BW)을 산출하는 배관 고장 예측 방법.

<수식 1-1>

$$BW = \frac{9 \cdot \text{전파속도} \cdot 100}{2 \cdot \pi \cdot a \cdot L} \text{ [Hz]}$$

(BW(Hz): 주파수 폭의 값, a(%): 진단대상 배관의 길이 대비 원하는 분해능, L(m): 진단대상 배관의 길이)

<수식 1-2>

$$\text{전파속도} = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}} \text{ [m/s]}$$

(E: 진단대상 배관 재료의 탄성계수(Young's modulus), ν : 진단대상 배관 재료의 포아송 비(Poisson's ratio), ρ : 진단대상 배관 재료의 질량 밀도(mass density))

청구항 15

제 13 항에 있어서, 상기 지속시간 값(TD)은,

다음 수식 2로 표현되는 지속시간 값(TD) 산출식을 이용하여 상기 진단대상 배관의 분해능 성능에 따른 지속시간 값(TD)을 산출하는 배관 고장 예측 방법.

<수식 2>

$$0.5 < \sqrt{BW * TD} < 1.5$$

(BW(Hz): 주파수 폭의 값, TD(sec): 지속시간 값)

청구항 16

제 13 항에 있어서, 상기 중심주파수 값(CF)은,

상기 산출된 주파수 폭의 값(BW) 및 지속시간 값(TD)을 기준으로 기 설정된 중심주파수 범위로부터 최종 중심주파수 값(CF)을 도출하는 배관 고장 예측 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 배관 고장 예측에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 배관의 특성에 따른 유도 초음파 최적신호를 설계하고 이를 인가함으로써 배관의 고장위치 및 고장정도를 예측하는 배관 고장 예측 장치 및 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 최근 들어 노후된 온수관, 가스관 등의 파열 사고가 빈번히 발생함에 따라 경제적 손실이 매우 큰 상황이다. 특히 배관 구조물의 경우, 모든 산업시설의 기반이 되는 구조물로서 배관 구조물의 결함 발생은 사회적 재앙으로 이어질 수 있는 위험을 안고 있다.

[0003] 일반적으로 배관의 고장 탐지 기술은 배관 구조물에 유도될 수 있는 초음파인 L, F, T mode 중 L, F mode을 이용한다. 이 때 L, F mode는 압축형 압전소자에 의해 발생되는데, 이는 배관 구조물 내부에 순환물이 존재할 경우 신호 감쇠가 매우 큰 한계점을 안고 있다. 또한, L, F mode은 수많은 n차 F mode가 동시에 발생하기 때문에, 신호 중첩이 발생하여 고장 탐지 정확도가 높지 않은 한계점을 안고 있다. 이에, 이러한 한계점을 보완하여 배관 구조물 내부의 순환물과 상관없이, 신호에 영향을 받지 않고 초음파를 이용해 배관의 고장을 탐지할 수 있는 기술을 개발할 필요성이 있다.

[0004] 마지막으로, L, F mode을 사용하고, 반사파 처리 방법을 활용하는 배관의 고장 탐지 기술은 배관의 원주 방향에서의 고장 위치를 추정하는 것이 어려운 한계점을 안고 있다. 이에, 이러한 한계점을 보완하여 반사파 처리 방법을 활용하는 배관의 고장 탐지 기술에 있어서, 길이 방향뿐만 아니라 원주 방향에서의 고장위치를 탐지할 수 있는 기술을 개발할 필요성이 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0005] (특허문헌 0001) 한국등록특허공보 제1826917호
(특허문헌 0002) 일본공개특허공보 제2016-114136호

발명의 내용

해결하려는 과제

[0006] 이에 본 발명은 상기와 같은 제반 사항을 고려하여 제안된 것으로, 배관 내부 물질과 상관없이 높은 정확도로 배관의 고장을 진단하는 것을 목적으로 한다.

[0007] 또한, 본 발명은 배관의 길이 방향뿐만 아니라, 원주 방향에 있어서도 고장 위치를 진단하는 것을 목적으로 한다.

[0008] 또한, 본 발명은 반사파 처리 방법에 따른 고장 진단을 위해 최적신호 인가부, 반사신호 입력부 및 고장 예측부가 한 곳에 모여있어 진단 장비 체결이 용이하며, 넓은 범위에 있어서도 고장위치 진단 커버가 가능하도록 하는 것을 목적으로 한다.

[0009] 또한, 본 발명은 배관의 특성에 따른 최적신호를 설계하고 이를 인가하여 고장을 진단함으로써, 진단대상 각 배관별로 정확한 진단 결과를 제공하는 것을 목적으로 한다.

[0010] 또한, 본 발명은 진단대상 각 배관별로 원하는 분해능 및 분해능 성능에 따른 최적신호를 설계함으로써, 각 배관별로 맞춤형 진단 결과를 제공하는 것을 목적으로 한다.

- [0011] 또한, 본 발명은 비파괴적으로 배관의 고장위치 및 고장정도를 예측할 수 있도록 하는 것으로 목적으로 한다.
- [0012] 또한, 본 발명은 관리자들이 접근하기 어려운 위치에 주로 위치한 배관 구조물에도 적용이 가능하며, 육안으로 전부 확인하기 어려운 배관 구조물에도 적용이 가능하도록 하는 것을 목적으로 한다.
- [0013] 또한, 본 발명은 배관 구조물 규격에 맞게 조절 가능한 구조로 설계함으로써, 수도관 파열 탐지 및 예방, 가스관의 가스 유출 및 예방, 송유관 누수 탐지 및 예방, 원자력 발전소의 냉각수 파이프 결함을 포함하는 다양한 배관 고장 진단 기술에 적용이 가능하도록 하는 것을 목적으로 한다.
- [0014] 본 발명의 목적들은 이상에서 언급한 목적들로 제한되지 않으며, 언급되지 않은 또 다른 목적들은 아래의 기재로부터 당업자에게 명확하게 이해할 수 있을 것이다.

과제의 해결 수단

- [0015] 상기와 같은 목적을 달성하기 위하여 본 발명의 기술적 사상에 의한 배관 고장 예측 장치는 진단대상 배관의 특성을 고려하여 유도 초음파 최적신호를 설계하는 최적신호 설계부, 최적신호 설계부로부터 설계된 최적신호를 진단대상 배관에 인가하여 유도 초음파를 진단대상 배관의 길이방향으로 발생시키는 최적신호 인가부, 최적신호 인가부로부터 인가된 최적신호가 진단대상 배관의 임의의 지점으로부터 반사되어 생성된 적어도 하나 이상의 반사신호를 입력받는 반사신호 입력부, 반사신호 입력부로부터 입력받은 적어도 하나 이상의 반사신호에 기초하여 진단대상 배관의 고장위치 및 고장정도를 예측하는 고장예측부를 포함할 수 있다.
- [0016] 이 때 최적신호 설계부는 비틀림 모드(T mode: Torsional mode)의 유도 초음파 최적신호를 설계할 수 있다.
- [0017] 최적신호 설계부는 진단대상 배관의 특성인 규격에 따라 주파수 폭 값(BW)을 산출하는 주파수 폭 값 산출부, 주파수 폭 값 산출부로부터 산출된 주파수 폭 값(BW)을 기초로 지속시간 값(TD)을 산출하는 지속시간 값 산출부, 주파수 폭 값 산출부로부터 산출된 주파수 폭 값(BW) 및 지속시간 값 산출부로부터 산출된 지속시간 값(TD)을 기초로 중심주파수 값(CF)을 산출하는 중심주파수 값 산출부를 포함할 수 있다.
- [0018] 주파수 폭 값(BW)은 다음 수식 1-1, 수식 1-2로 표현되는 주파수 폭 값(BW) 산출식을 이용하여 진단대상 배관의 규격인 길이에 따른 주파수 폭 값(BW)을 산출할 수 있다.

[0019] <수식 1-1>

$$BW = \frac{9 \cdot \text{전파속도} \cdot 100}{2 \cdot \pi \cdot a \cdot L} \text{ [Hz]}$$

[0020]

(BW(Hz): 주파수 폭의 값, a(%): 진단대상 배관의 길이 대비 원하는 분해능, L(m): 진단대상 배관의 길이)

[0022] <수식 1-2>

$$\text{전파속도} = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}} \text{ [m/s]}$$

[0023]

(E: 진단대상 배관 재료의 탄성계수(Young's modulus), ν : 진단대상 배관 재료의 포아송 비(Poisson's ratio), ρ : 진단대상 배관 재료의 질량 밀도(mass density))

[0025] 지속시간 값(TD)은 다음 수식 2로 표현되는 지속시간 값(TD) 산출식을 이용하여 진단대상 배관의 분해능 성능에 따른 지속시간 값(TD)을 산출할 수 있다.

[0026] <수식 2>

$$0.5 < \sqrt{BW * TD} < 1.5$$

[0027]

(BW(Hz): 주파수 폭의 값, TD(sec): 지속시간 값)

[0028]

[0029] 중심주파수 값(CF)은 산출된 주파수 폭의 값(BW) 및 지속시간 값(TD)을 기준으로 기 설정된 중심주파수 범위로부터 최종 중심주파수 값(CF)을 도출할 수 있다.

[0029]

[0030] 최적신호 인가부는 진단대상 배관 외측 표면의 원주 방향을 따라 소정의 간격으로 부착되는 복수 개의 진단형

[0030]

(Shear) 압전소자 센서 모듈을 포함하여, 원주방향에서의 고장위치를 예측할 수 있다.

[0031] 고장예측부는 반사신호 입력부로부터 입력받은 적어도 하나 이상의 반사신호를 시간-주파수 영역으로 변환하는 시간-주파수 변환부, 시간-주파수 변환부로부터 변환된 시간-주파수 영역을 상호상관함수로 분석하여 진단대상 배관의 고장위치 및 고장정도를 예측하는 고장위치 및 고장정도 예측부를 포함할 수 있다.

[0032] 상기와 같은 목적을 달성하기 위하여 본 발명의 기술적 사상에 의한 배관 고장 예측 방법은 최적신호 설계부에서 진단대상 배관의 특성을 고려하여 유도 초음파 최적신호를 설계하는 최적신호 설계단계, 최적신호 인가부에서 최적신호 설계단계로부터 설계된 최적신호를 진단대상 배관에 인가하여 유도 초음파를 진단대상 배관의 길이 방향으로 발생시키는 최적신호 인가단계, 반사신호 입력부에서 최적신호 인가단계로부터 인가된 최적신호가 진단대상 배관의 임의의 지점으로부터 반사되어 생성된 적어도 하나 이상의 반사신호를 입력받는 반사신호 입력단계, 고장예측부에서 반사신호 입력단계로부터 입력받은 적어도 하나 이상의 반사신호에 기초하여 진단대상 배관의 고장위치 및 고장정도를 예측하는 고장예측단계를 포함할 수 있다.

[0033] 최적신호 설계단계는 비틀림 모드(T mode: Torsional mode)의 유도 초음파 최적신호를 설계할 수 있다.

[0034] 최적신호 설계단계는 주파수 폭 값 산출부에서 진단대상 배관의 특성인 규격에 따라 주파수 폭 값(BW)을 산출하는 주파수 폭 값 산출단계, 지속시간 값 산출부에서 주파수 폭 값 산출단계로부터 산출된 주파수 폭 값(BW)을 기초로 지속시간 값(TD)을 산출하는 지속시간 값 산출단계, 중심주파수 값 산출부에서 주파수 폭 값 산출단계로부터 산출된 주파수 폭 값(BW) 및 지속시간 값 산출단계로부터 산출된 지속시간 값(TD)을 기초로 중심주파수 값(CF)을 산출하는 중심주파수 값 산출단계를 포함할 수 있다.

[0035] 주파수 폭 값(BW)은 다음 수식 1-1, 수식 1-2로 표현되는 주파수 폭 값(BW) 산출식을 이용하여 진단대상 배관의 규격인 길이에 따른 주파수 폭 값(BW)을 산출할 수 있다.

[0036] <수식 1-1>

$$BW = \frac{9 \cdot \text{전파속도} \cdot 100}{2 \cdot \pi \cdot a \cdot L} \text{ [Hz]}$$

[0037]

(BW(Hz): 주파수 폭의 값, a(%): 진단대상 배관의 길이 대비 원하는 분해능, L(m): 진단대상 배관의 길이)

[0039] <수식 1-2>

$$\text{전파속도} = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}} \text{ [m/s]}$$

[0040]

(E: 진단대상 배관 재료의 탄성계수(Young's modulus), ν : 진단대상 배관 재료의 포아송 비(Poisson's ratio), ρ : 진단대상 배관 재료의 질량 밀도(mass density))

[0042] 지속시간 값(TD)은 다음 수식 2로 표현되는 지속시간 값(TD) 산출식을 이용하여 진단대상 배관의 분해능 성능에 따른 지속시간 값(TD)을 산출할 수 있다.

[0043] <수식 2>

$$0.5 < \sqrt{BW * TD} < 1.5$$

[0044]

(BW(Hz): 주파수 폭의 값, TD(sec): 지속시간 값)

[0046] 중심주파수 값(CF)은 산출된 주파수 폭의 값(BW) 및 지속시간 값(TD)을 기준으로 기 설정된 중심주파수 범위로부터 최종 중심주파수 값(CF)을 도출할 수 있다.

[0047] 최적신호 인가단계는 진단대상 배관 외측 표면의 원주 방향을 따라 소정의 간격으로 부착되는 복수 개의 전단형(Shear) 압전소자 센서 모듈을 통해, 원주방향에서의 고장위치를 예측할 수 있다.

[0048] 고장예측단계는 시간-주파수 변환부에서 반사신호 입력단계로부터 입력받은 적어도 하나 이상의 반사신호를 시간-주파수 영역으로 변환하는 시간-주파수 변환단계 및 고장위치 및 고장정도 예측부에서 시간-주파수 변환단계로부터 변환된 시간-주파수 영역을 상호상관함수로 분석하여 진단대상 배관의 고장위치 및 고장정도를 예측하는

고장위치 및 고장정도 예측단계를 포함할 수 있다.

발명의 효과

- [0049] 이상에서 설명한 바와 같은 배관 고장 예측 장치 및 방법에 따르면,
- [0050] 첫째, 배관 내부 물질과 상관없이 높은 정확도로 배관의 고장을 진단할 수 있는 효과를 가진다.
- [0051] 둘째, 배관의 길이 방향뿐만 아니라, 원주 방향에 있어서도 고장 위치를 진단할 수 있는 효과를 가진다.
- [0052] 셋째, 반사파 처리 방법에 따른 고장 진단을 위해 최적신호 인가부, 반사신호 입력부 및 고장 예측부가 한 곳에 모여있어 진단 장비 체결이 용이하며, 넓은 범위에 있어서도 고장위치 진단 커버가 가능한 효과를 가진다.
- [0053] 넷째, 배관의 특성에 따른 최적신호를 설계하고 이를 인가하여 고장을 진단함으로써, 진단대상 각 배관별로 정확한 진단 결과를 제공할 수 있는 효과를 가진다.
- [0054] 다섯째, 진단대상 각 배관별로 원하는 분해능 및 분해능 성능에 따른 최적신호를 설계함으로써, 각 배관별로 맞춤형 진단 결과를 제공할 수 있는 효과를 가진다.
- [0055] 여섯째, 비파괴적으로 배관의 고장위치 및 고장정도를 예측할 수 있는 효과를 가진다.
- [0056] 일곱째, 관리자들이 접근하기 어려운 위치에 주로 위치한 배관 구조물에도 적용이 가능하며, 육안으로 전부 인하기 어려운 배관 구조물에도 적용이 가능한 효과를 가진다.
- [0057] 여덟째, 배관 구조물 규격에 맞게 조절 가능한 구조로 설계함으로써, 수도관 파열 탐지 및 예방, 가스관의 가스 유출 및 예방, 송유관 누수 탐지 및 예방, 원자력 발전소의 냉각수 파이프 결함을 포함하는 다양한 배관 고장 진단 기술에 적용이 가능한 효과를 가진다.

도면의 간단한 설명

- [0058] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 배관 고장 예측 장치를 나타낸 구성도.
- 도 2는 도 1에 따른 최적신호 설계부(100)를 나타낸 구성도.
- 도 3은 도 1에 따른 고장예측부(400)를 나타낸 구성도.
- 도 4는 본 발명의 실시예에 따른 배관 고장 예측 방법을 나타낸 순서도.
- 도 5는 도 4에 따른 최적신호 설계단계(S100)를 나타낸 순서도.
- 도 6은 도 4에 따른 고장예측단계(S400)를 나타낸 순서도.
- 도 7a는 본 발명의 실시예로서, 최적신호 설계 및 최소 전단형 압전소자 개수 결정 시 활용되는 진단대상 배관(P)의 유도 초음파 균속도 그래프를 나타낸 도면.
- 도 7b는 본 발명의 실시예로서, 최적신호 설계 시 활용되는 반사신호 유사도 그래프를 나타낸 도면.
- 도 8a 및 도 8b는 본 발명의 실시예에 따른 압전소자 센서 모듈을 나타낸 도면.
- 도 8c는 본 발명의 실시예에 따라 진단대상 배관(P) 외측 표면 원주 방향을 따라 링 형태로 압전소자 센서 모듈을 부착한 형태를 나타낸 도면.
- 도 9는 본 발명의 실시예에 따른 최적신호 인가부(200), 반사신호 입력부(300) 및 고장 예측부(400)의 통합에 대한 검증 결과를 나타낸 도면.
- 도 10은 본 발명의 실시예로서 진단대상 배관의 길이가 5m일 때 3m 지점에서 발생한 결함을 크기별(Level)로 나타낸 도면.
- 도 10a는 본 발명의 실시예로서 정상상태의 진단대상 배관 결과를 나타낸 도면.
- 도 10b는 도 10에 따른 결함 레벨 1의 결과를 나타낸 도면.
- 도 10c는 도 10에 따른 결함 레벨 2의 결과를 나타낸 도면.
- 도 10d는 도 10에 따른 결함 레벨 3의 결과를 나타낸 도면.

도 11은 본 발명의 실시예로서 압전소자 센서 모듈이 부착된 진단대상 배관(P)의 단면도.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0059] 본 발명과 본 발명의 동작상의 이점 및 본 발명의 실시에 의하여 달성되는 목적을 충분히 이해하기 위해서는 본 발명의 바람직한 실시예를 예시하는 첨부 도면 및 첨부 도면에 기재된 내용을 참조하여야만 한다. 본 발명의 특징 및 이점들은 첨부 도면에 의거한 다음의 상세한 설명으로 더욱 명백해질 것이다. 이에 앞서, 본 명세서 및 청구범위에 사용된 용어나 단어는 발명자가 그 자신의 발명의 가장 최선의 방법으로 설명하기 위해 용어의 개념을 적절하게 정의할 수 있다는 원칙에 입각하여 본 발명의 기술적 사상에 부합하는 의미와 개념으로 해석되어야 할 것이다. 또한 본 발명과 관련된 공지 기능 및 그 구성에 대한 구체적인 설명은 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 경우, 그 구체적인 설명을 생략하였음에 유의해야 할 것이다.

[0060] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 배관 고장 예측 장치를 나타낸 구성도이고, 도 2는 도 1에 따른 최적신호 설계부(100)를 나타낸 구성도이고, 도 3은 도 1에 따른 고장예측부(400)를 나타낸 구성도이다.

[0061] 먼저 도 1을 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 배관 고장 예측 장치는 최적신호 설계부(100), 최적신호 인가부(200), 반사신호 입력부(300) 및 고장 예측부(400)를 포함할 수 있다.

[0062] 최적신호 설계부(100)는 유도 초음파 최적신호를 설계할 수 있다. 이 때 유도 초음파 최적신호 설계 시, 진단대상 배관(P)의 특성을 고려하여 설계할 수 있다. 이는 진단대상 각 배관별로 정확한 진단 결과를 제공하기 위해, 각 배관 특성에 적합한 최적신호를 설계하기 위한 구성요소라 할 수 있다. 이 때 진단대상 배관(P)의 특성은 길이 등의 규격, 재질을 포함하는 것이라 할 수 있다. 한편, 진단대상 배관(P)은 원 형태의 배관을 주요 진단대상 배관이라 할 수 있으나, 사용자의 진단 방법 및 환경 등에 따라 다양한 형태의 배관을 진단대상 배관이라 할 수 있다.

[0063] 보다 상세하게 도 2를 참조하면, 최적신호 설계부(100)는 주파수 폭 값 산출부(110), 지속시간 값 산출부(130) 및 중심주파수 값 산출부(150)를 포함하여 최적신호를 설계할 수 있다. 이는 배관의 진단을 위해 시간-주파수 영역 반사 측정(TFDR: Time-frequency domain reflectometry) 신호를 설계하기 위한 구성요소들로서, 각 구성요소(110, 130 및 150)를 통해 도출된 각 값이 최적신호를 결정하는 요소라 할 수 있다. 보다 상세하게 상기 최적신호는 시간-주파수 영역 반사 측정에서 사용하는 신호인 가우시안 포락선 선형 칩(GELC: Gaussian enveloped linear chirp) 신호 중에 가장 적합한 신호로서, 이는 각 구성요소(110, 130 및 150)를 통해 도출된 각 값인 주파수 폭 값, 지속시간 값 및 중심주파수 값이 산출되면 결정될 수 있다.

[0064] 이 때, 가우시안 포락선 선형 칩 신호가 결정되는 수식은 아래와 같다.

[0065] <가우시안 포락선 선형 칩 신호=s(t)>

$$s(t) = e^{-\frac{\alpha}{2}(t-t_0)^2 + j\frac{\beta}{2}(t-t_0)^2 + j\omega_0(t-t_0)}$$

$$\alpha = \frac{36}{TD^2}$$

$$\beta = \frac{1}{3} \sqrt{\alpha \pi^2 * BW^2 - \alpha^2}$$

$$\omega_0 = 2\pi * CF$$

[0066]

[0067] (CF: 중심 주파수, BW: 주파수폭, TD: 지속시간, t0는 time delay 값)

[0068] 이 때, t0은 파형발생기 상에서 신호를 얼마나 딜레이시켜서 보낼지 결정하는 값으로 신호의 모양과는 무관한 값이라 할 수 있다.

[0069] 한편, 최적신호는 진단대상 각 배관(P)별로 원하는 분해능 및 분해능 성능에 따라 설계할 수 있는데, 이는 각 배관별로 맞춤형 진단 결과를 제공할 수 있는 이점을 가질 수 있다.

[0070] 주파수 폭 값 산출부(110)는 진단대상 배관(P)의 특성인 규격에 따라 주파수 폭 값(BW)을 산출할 수 있다. 주파

수 폭 값(BW)은 분해능(Resolution)에 의해 결정될 수 있는데, 이 때 분해능은 시간-주파수 영역 반사 측정법(TFDR)으로 배관의 결함(고장)과 결함 사이를 분간할 수 있는 최소 거리라 할 수 있다. 이에 주파수 폭 값(BW)은 진단대상 배관(P)의 규격인 길이 대비 원하는 분해능을 a(%)라 하면, 다음 수식 1-1, 수식 1-2로 표현되는 주파수 폭 값(BW) 산출식을 이용하여 산출될 수 있다.

[0071] <수식 1-1>

$$BW = \frac{9 \cdot \text{전파속도} \cdot 100}{2 \cdot \pi \cdot a \cdot L} \text{ [Hz]}$$

[0072] (BW(Hz): 주파수 폭의 값, a(%): 진단대상 배관의 길이 대비 원하는 분해능, L(m): 진단대상 배관의 길이)

[0074] <수식 1-2>

$$\text{전파속도} = \sqrt{\frac{E}{2(1+v)\rho}} \text{ [m/s]}$$

[0075] (E: 진단대상 배관 재료의 탄성계수(Young's modulus), v: 진단대상 배관 재료의 포아송 비(Poisson's ratio), p: 진단대상 배관 재료의 질량 밀도(mass density))

[0077] 지속시간 값 산출부(130)는 주파수 폭 값 산출부(110)로부터 산출된 주파수 폭 값(BW)을 기초로 지속시간 값(TD)을 산출할 수 있다. 지속시간 값(TD)은 주파수 폭 값(BW)과 지속시간 값(TD) 간의 불확정성 원리에 따라 최소 지속시간 값(TD)이 결정될 수 있는데, 이 때 불확정성 원리에 따른 주파수 폭 값(BW) 및 지속시간 값(TD)은

$$\sqrt{BW * TD} > 0.5 \text{을 만족할 수 있다.}$$

[0078] 다만 일반적으로 지속시간 값(TD)이 커지면 최적신호 에너지가 커지지만, 지속시간 값(TD)이 너무 커지면 분해능 성능에 영향을 미치기 때문에, 지속시간 값(TD)은 다음 수식 2로 표현되는 지속시간 값(TD) 산출식을 이용하여 산출될 수 있다.

[0079] <수식 2>

$$0.5 < \sqrt{BW * TD} < 1.5$$

[0080] (BW(Hz): 주파수 폭의 값, TD(sec): 지속시간 값)

[0082] 중심주파수 값 산출부(150)는 주파수 폭 값 산출부(110)로부터 산출된 중심주파수 폭 값(BW) 및 지속시간 값 산출부(130)로부터 산출된 지속시간 값(TD)을 기초로 중심주파수 값(CF)을 산출할 수 있다. 보다 상세하게 최종 중심주파수 값(CF)은 주파수 폭 값 산출부(110)로부터 산출된 중심주파수 폭 값(BW) 및 지속시간 값 산출부(130)로부터 산출된 지속시간 값(TD)을 기준으로 기 설정된 중심주파수 범위로부터 도출할 수 있다.

[0083] 이 때 기 설정된 중심주파수 범위 도출은 다음과 같다. 주파수 폭 값 산출부(110)로부터 산출된 중심주파수 폭 값(BW)을 n(Hz)라 하면, 이론적으로 생성 가능한 최소 중심주파수 값은 '최소 중심주파수 값 = n/2(Hz)'로부터 산출할 수 있다. 그리고 최대 중심주파수 값은 진단대상 배관(P)의 유도 초음파 군속도 그래프를 바탕으로 산출할 수 있다. 보다 상세하게 최대 중심주파수 값은 링(Ring) 형태의 압전소자 개수가 10개이면, 군속도 그래프에서 F(10, 2)의 cut-off frequency(약 250kHz)가 압전소자 10개로 생성 가능한 최대 중심주파수 값이 될 수 있다. 다시 말해, 압전소자 10개로 250kHz 이상의 신호를 만들 경우, F(10, 2)의 신호가 발생하기 시작하면서 순수한 비틀림 모드의 유도 초음파 최적신호가 아닌 T mode+F mode가 발생하여 원하지 않는 신호로 인한 정확도 감소가 발생할 수 있다.

[0084] 한편, 최적신호 설계부(100)는 비틀림 모드(T mode: Torsional mode)의 유도 초음파 최적신호를 설계할 수 있다. 이는 유도 초음파를 진단대상 배관(P)의 길이방향으로 발생시키기 위해서 비틀림 모드(T mode: Torsional mode)의 유도 초음파 최적신호를 설계하는 것이라 할 수 있다. 비틀림 모드는 탄젠셜(Tangential)하게 발생하는 초음파 신호로서, 진단대상 배관(P)에 물과 같은 내부 물질이 존재하더라도 감쇠 영향을 거의 받지 않을 수 있다. 이는 진단대상 배관(P) 내에 물을 순환시키면서도 고장 진단이 가능한 이점을 가질 수 있다.

- [0085] 최적신호 인가부(200)는 최적신호 설계부(100)로부터 설계된 최적신호를 진단대상 배관(P)에 인가하여 유도 초음파를 진단대상 배관(P)의 길이방향으로 발생시킬 수 있다. 이는 유도 초음파를 진단대상 배관(P)의 길이방향으로 발생시킴으로써, 1차적으로 길이방향에서의 고장위치를 진단하기 위한 구성요소라 할 수 있다.
- [0086] 그리고 최적신호 인가부(200)는 진단대상 배관(P)의 외측 표면에 부착되는 압전소자 센서 모듈을 포함할 수 있다. 이는 유도초음파 즉, 기계적인 진동을 계측하기 위한 것으로서, 콘크리트와 같은 배관의 재질 또는 전도도와 무관하게 계측이 가능하도록 하기 위한 것이라 할 수 있다. 또한, 압전소자는 유도초음파를 정밀하게 발생시키기 위해 전기적 신호를 기계적 진동으로 변환시켜주기 위한 것이라 할 수 있다. 한편, 센서 모듈의 종류는 압전소자 외에 TFDR의 신호를 정밀하게 발생시킬 수 있는 소자이면서, 비틀림 모드를 위해 진단대상 배관(P)의 곡면과 탄젠셜한 방향으로 진동을 줄 수 있는 다양한 종류의 소자로 용이하게 변경할 수 있다.
- [0087] 압전소자 센서 모듈은 전단형(Shear) 압전소자를 이용할 수 있다. 이는 유도 초음파를 진단대상 배관(P)의 길이방향, 즉 좌우로 발생시키기 위해 좌우로 흔들리는 전단형 압전소자를 이용하는 것이라 할 수 있다. 일반적인 소자는 유도 초음파를 진단대상 배관(P)의 길이와 수직방향, 즉 상하로 발생시키기 위해 상하로 흔들리는 것을 특징으로 한다.
- [0088] 이 때 전단형 압전소자는 복수 개로 구성되어, 진단대상 배관(P) 외측 표면에 원주 방향을 따라 부착되어 링(Ring) 형태로 제작할 수 있다. 이는 순수한 비틀림 모드의 유도 초음파를 발생시켜 2차적으로 진단대상 배관(P) 원주 방향에서의 고장위치를 예측하기 위한 것이라 할 수 있다. 다시 말해, 진단대상 배관(P) 외측 표면에 원주 방향을 따라 복수 개의 전단형 압전소자를 부착하여 순수한 비틀림 모드의 유도 초음파를 발생시킴으로써, 진단대상 배관(P)의 길이 방향뿐만 아니라 원주 방향에 있어서도 고장위치를 예측하기 위한 것이라 할 수 있다. 한편, 전단형 압전소자는 복수 개로 구성될 때 소정의 간격으로 진단대상 배관(P) 외측 표면에 부착될 수 있다.
- [0089] 한편, 진단대상 배관(P)의 길이방향, 즉 좌우로 유도 초음파를 발생시키기 위해, 압전소자 센서 모듈의 링(Ring)을 1set라 할 때 이는 2줄(또는 2겹)의 링으로 구성할 수 있다.
- [0090] 반사신호 입력부(300)는 최적신호 인가부(200)로부터 인가된 최적신호가 진단대상 배관(P)의 임의의 지점으로부터 반사되어 생성된 적어도 하나 이상의 반사신호를 입력받을 수 있다. 이는 진단대상 배관(P)의 고장위치 및 고장정도를 예측하기 위해 이용되는 신호를 입력받기 위한 구성요소로서, 최적신호를 진단대상 배관(P)에 인가하였을 때 임피던스 불연속점에서 반사되어 돌아오는 반사신호를 입력받을 수 있다.
- [0091] 고장 예측부(400)는 반사신호 입력부(300)로부터 입력받은 적어도 하나 이상의 반사신호에 기초하여 진단대상 배관(P)의 고장위치 및 고장정도를 예측할 수 있다. 이는 비파괴적으로 진단대상 배관(P)의 고장위치 및 고장정도를 예측하기 위한 구성요소라 할 수 있다.
- [0092] 보다 상세하게, 도 3을 참조하면 고장 예측부(400)는 시간-주파수 변환부(410), 고장위치 및 고장정도 예측부(430)를 포함하여 진단대상 배관(P)의 고장을 예측할 수 있다.
- [0093] 시간-주파수 변환부(410)는 반사신호 입력부(300)로부터 입력받은 적어도 하나 이상의 반사신호를 시간-주파수 영역으로 변환할 수 있다. 이는 고장 예측의 정확도 및 유리한 분해능을 위한 구성요소라 할 수 있다.
- [0094] 고장위치 및 고장정도 예측부(430)는 시간-주파수 변환부(410)로부터 변환된 시간-주파수 영역을 상호상관함수로 분석하여 진단대상 배관(P)의 고장위치 및 고장정도를 예측할 수 있다. 이 또한 고장 예측의 정확도 및 유리한 분해능을 위한 구성요소라 할 수 있다.
- [0095] 보다 상세하게 시간-주파수 영역 반사 측정은 GELC 전압신호 인가, 반사신호 측정, 시간 영역의 반사신호를 시간-주파수 영역으로 변환, 시간-주파수 영역에서 기준신호(인가하는 최적신호)와 반사신호 간의 유사도를 상호상관함수 비교를 통해 결함의 위치를 추정할 수 있다. 이 때 측정대상에 인가한 신호인 기준신호와, 반사신호 간의 유사도를 비교하는 것은 시간 영역에서 비교하는 것보다 시간-주파수 영역에서 비교하는 것이 고장 예측의 정확도가 더 높고 분해능에 있어서도 더 유리한 이점을 가질 수 있다. 이에 시간-주파수 변환부(410)는 반사신호 입력부(300)로부터 입력받은 적어도 하나 이상의 반사신호를 시간-주파수 영역으로 변환하고, 고장위치 및 고장정도 예측부(430)는 시간-주파수 변환부(410)로부터 변환된 시간-주파수 영역을 상호상관함수로 분석하여 진단대상 배관(P)의 고장위치 및 고장정도를 예측할 수 있다.
- [0096] 도 4는 본 발명의 실시예에 따른 배관 고장 예측 방법을 나타낸 순서도이고, 도 5는 도 4에 따른 최적신호 설계단계(S100)를 나타낸 순서도이고, 도 6은 도 4에 따른 고장예측단계(S400)를 나타낸 순서도이다.
- [0097] 도 4를 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 배관 고장 예측 방법은 최적신호 설계단계(S100), 최적신호 인가단

계(S200), 반사신호 입력단계(S300) 및 고장예측단계(S400)를 포함할 수 있다.

[0098] 먼저 최적신호 설계부(100)에서는 진단대상 배관의 특성을 고려하여 유도 초음파 최적신호를 설계할 수 있다(S100). 이는 진단대상 각 배관별로 정확한 진단 결과를 제공하기 위해, 각 배관 특성에 적합한 최적신호를 설계하기 위한 단계라 할 수 있다. 이 때 진단대상 배관(P)의 특성은 길이 등의 규격, 재질을 포함하는 것이라 할 수 있다. 한편, 진단대상 배관(P)은 원 형태의 배관을 주요 진단대상 배관이라 할 수 있으나, 사용자의 진단 방법 및 환경 등에 따라 다양한 형태의 배관을 진단대상 배관이라 할 수 있다.

[0099] 보다 상세하게 도 5를 참조하면, 최적신호 설계단계(S100)는 주파수 폭 값 산출단계(S110), 지속시간 값 산출단계(S130) 및 중심주파수 값 산출단계(S150)를 포함하여 최적신호를 설계할 수 있다. 이는 배관의 진단을 위해 시간-주파수 영역 반사 측정(TFDR: Time-frequency domain reflectometry) 신호를 설계하기 위한 단계들로서, 각 단계들(S110, S130 및 S150)을 통해 도출된 각 값이 최적신호를 결정하는 요소라 할 수 있다. 보다 상세하게 상기 최적신호는 시간-주파수 영역 반사 측정에서 사용하는 신호인 가우시안 포락선 선형 첵(GELC: Gaussian enveloped linear chirp) 신호 중에 가장 적합한 신호로서, 이는 각 구성요소(110, 130 및 150)를 통해 도출된 각 값인 주파수 폭 값, 지속시간 값 및 중심주파수 값이 산출되면 결정될 수 있다.

[0100] 이 때, 가우시안 포락선 선형 첵 신호가 결정되는 수식은 아래와 같다.

[0101] <가우시안 포락선 선형 첵 신호=s(t)>

$$s(t) = e^{-\frac{\alpha}{2}(t-t_0)^2 + j\frac{\beta}{2}(t-t_0)^2 + j\omega_0(t-t_0)}$$

$$\alpha = \frac{36}{TD^2}$$

$$\beta = \frac{1}{3} \sqrt{\alpha \pi^2 * BW^2 - \alpha^2}$$

$$\omega_0 = 2\pi * CF$$

[0102]

[0103] (CF: 중심 주파수, BW: 주파수폭, TD: 지속시간, t0는 time delay 값)

[0104] 이 때, t0은 파형발생기 상에서 신호를 얼마나 딜레이시켜서 보낼지 결정하는 값으로 신호의 모양과는 무관한 값이라 할 수 있다.

[0105] 한편, 최적신호는 진단대상 각 배관(P)별로 원하는 분해능 및 분해능 성능에 따라 설계할 수 있는데, 이는 각 배관별로 맞춤형 진단 결과를 제공할 수 있는 이점을 가질 수 있다.

[0106] 주파수 폭 값 산출단계는 진단대상 배관(P)의 특성인 규격에 따라 주파수 폭 값(BW)을 산출할 수 있다(S110). 주파수 폭 값(BW)은 분해능(Resolution)에 의해 결정될 수 있는데, 이 때 분해능은 시간-주파수 영역 반사 측정법(TFDR)으로 배관의 결함(고장)과 결함 사이를 분간할 수 있는 최소 거리라 할 수 있다. 이에 주파수 폭 값(BW)은 진단대상 배관(P)의 규격인 길이 대비 원하는 분해능을 a(%)라 하면, 다음 수식 1-1, 수식 1-2로 표현되는 주파수 폭 값(BW) 산출식을 이용하여 산출될 수 있다.

[0107] <수식 1-1>

$$BW = \frac{9 * \text{전파속도} * 100}{2 * \pi * a * L} \text{ [Hz]}$$

[0108]

[0109] (BW(Hz): 주파수 폭의 값, a(%): 진단대상 배관의 길이 대비 원하는 분해능, L(m): 진단대상 배관의 길이)

[0110] <수식 1-2>

$$\text{전파속도} = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}} \text{ [m/s]}$$

[0111]

- [0112] (E: 진단대상 배관 재료의 탄성계수(Young's modulus), ν : 진단대상 배관 재료의 포아송 비(Poisson's ratio), ρ : 진단대상 배관 재료의 질량 밀도(mass density))
- [0113] 지속시간 값 산출단계는 주파수 폭 값 산출단계(S110)로부터 산출된 주파수 폭 값(BW)을 기초로 지속시간 값(TD)을 산출할 수 있다(S130). 지속시간 값(TD)은 주파수 폭 값(BW)과 지속시간 값(TD) 간의 불확정성 원리에 따라 최소 지속시간 값(TD)이 결정될 수 있는데, 이 때 불확정성 원리에 따른 주파수 폭 값(BW) 및 지속시간 값(TD)은 $\sqrt{BW * TD} > 0.5$ 을 만족할 수 있다.
- [0114] 다만 일반적으로 지속시간 값(TD)이 커지면 최적신호 에너지가 커지지만, 지속시간 값(TD)이 너무 커지면 분해능 성능에 영향을 미치기 때문에, 지속시간 값(TD)은 다음 수식 2로 표현되는 지속시간 값(TD) 산출식을 이용하여 산출될 수 있다.
- [0115] <수식 2>
- [0116] $0.5 < \sqrt{BW * TD} < 1.5$
- [0117] (BW(Hz): 주파수 폭의 값, TD(sec): 지속시간 값)
- [0118] 중심주파수 값 산출단계는 주파수 폭 값 산출단계(S110)로부터 산출된 중심주파수 폭 값(BW) 및 지속시간 값 산출단계(S130)로부터 산출된 지속시간 값(TD)을 기초로 중심주파수 값(CF)을 산출할 수 있다(S150). 보다 상세하게 최종 중심주파수 값(CF)은 주파수 폭 값 산출단계(S110)로부터 산출된 중심주파수 폭 값(BW) 및 지속시간 값 산출단계(S130)로부터 산출된 지속시간 값(TD)을 기준으로 기 설정된 중심주파수 범위로부터 도출할 수 있다.
- [0119] 이 때 기 설정된 중심주파수 범위 도출은 다음과 같다. 주파수 폭 값 산출단계(S110)로부터 산출된 중심주파수 폭 값(BW)을 n (Hz)라 하면, 이론적으로 생성 가능한 최소 중심주파수 값은 '최소 중심주파수 값 = $n/2$ (Hz)'로부터 산출할 수 있다. 그리고 최대 중심주파수 값은 진단대상 배관(P)의 유도 초음파 군속도 그래프를 바탕으로 산출할 수 있다. 보다 상세하게 최대 중심주파수 값은 링(Ring) 형태의 압전소자 개수가 10개이면, 군속도 그래프에서 F(10, 2)의 cut-off frequency(약 250kHz)가 압전소자 10개로 생성 가능한 최대 중심주파수 값이 될 수 있다. 다시 말해, 압전소자 10개로 250kHz 이상의 신호를 만들 경우, F(10, 2)의 신호가 발생하기 시작하면서 순수한 비틀림 모드의 유도 초음파 최적신호가 아닌 T mode+F mode가 발생하여 원하지 않는 신호로 인한 정확도 감소가 발생할 수 있다.
- [0120] 한편, 최적신호 설계단계(S100)는 비틀림 모드(T mode: Torsional mode)의 유도 초음파와 최적신호를 설계할 수 있다. 이는 유도 초음파를 진단대상 배관(P)의 길이방향으로 발생시키기 위해서 비틀림 모드(T mode: Torsional mode)의 유도 초음파와 최적신호를 설계하는 것이라 할 수 있다. 비틀림 모드는 탄젠셜(Tangential)하게 발생하는 초음파 신호로서, 진단대상 배관(P)에 물과 같은 내부 물질이 존재하더라도 감쇠 영향을 거의 받지 않을 수 있다. 이는 진단대상 배관(P) 내에 물을 순환시키면서도 고장 진단이 가능한 이점을 가질 수 있다.
- [0121] 최적신호 인가단계는 최적신호 설계단계(S100)로부터 설계된 최적신호를 진단대상 배관(P)에 인가하여 유도 초음파를 진단대상 배관(P)의 길이방향으로 발생시킬 수 있다(S200). 이는 유도 초음파를 진단대상 배관(P)의 길이방향으로 발생시킴으로써, 1차적으로 길이방향에서의 고장위치를 진단하기 위한 단계라 할 수 있다.
- [0122] 한편, 최적신호 인가단계(S200)는 최적신호 인가부(200)에 포함된 압전소자 센서 모듈을 통해 진단대상 배관(P)의 고장위치를 예측할 수 있다. 이 때 압전소자 센서 모듈은 진단대상 배관(P)의 외측 표면에 부착될 수 있다. 이는 유도초음파 즉, 기계적인 진동을 계측하기 위한 단계로서, 콘크리트와 같은 배관의 재질 또는 전도도와 무관하게 계측이 가능하도록 하기 위한 것이라 할 수 있다. 또한, 압전소자는 유도초음파를 정밀하게 발생시키기 위해 전기적 신호를 기계적 진동으로 변환시켜주기 위한 것이라 할 수 있다. 한편, 센서 모듈의 종류는 압전소자 외에 TFDR의 신호를 정밀하게 발생시킬 수 있는 소자이면서, 비틀림 모드를 위해 진단대상 배관(P)의 곡면과 탄젠셜한 방향으로 진동을 줄 수 있는 다양한 종류의 소자로 용이하게 변경할 수 있다.
- [0123] 압전소자 센서 모듈은 전단형(Shear) 압전소자를 이용할 수 있다. 이는 유도 초음파를 진단대상 배관(P)의 길이방향, 즉 좌우로 발생시키기 위해 좌우로 흔들리는 전단형 압전소자를 이용하는 것이라 할 수 있다. 일반적인 소자는 유도 초음파를 진단대상 배관(P)의 길이와 수직방향, 즉 상하로 발생시키기 위해 상하로 흔들리는 것을 특징으로 한다.
- [0124] 이 때 전단형 압전소자는 복수 개로 구성되어, 진단대상 배관(P) 외측 표면에 원주 방향을 따라 부착되어 링

(Ring) 형태로 제작할 수 있다. 이는 2차적으로 진단대상 배관(P) 원주 방향에서의 고장위치를 예측하기 위한 것이라 할 수 있다. 다시 말해, 진단대상 배관(P) 외측 표면에 원주 방향을 따라 복수 개의 전단형 압전소자를 부착함으로써, 진단대상 배관(P)의 길이 방향뿐만 아니라 원주 방향에 있어서도 고장위치를 예측하기 위한 것이라 할 수 있다. 한편, 전단형 압전소자는 복수 개로 구성될 때 소정의 간격으로 진단대상 배관(P) 외측 표면에 부착될 수 있다. 이는 순수한 비틀림 모드의 유도 초음파를 발생시켜 2차적으로 진단대상 배관(P) 원주 방향에서의 고장위치를 예측하기 위한 것이라 할 수 있다. 다시 말해, 진단대상 배관(P) 외측 표면에 원주 방향을 따라 복수 개의 전단형 압전소자를 부착하여 순수한 비틀림 모드의 유도 초음파를 발생시킴으로써, 진단대상 배관(P)의 길이 방향뿐만 아니라 원주 방향에 있어서도 고장위치를 예측하기 위한 단계라 할 수 있다. 한편, 전단형 압전소자는 복수 개로 구성될 때 소정의 간격으로 진단대상 배관(P) 외측 표면에 부착될 수 있다.

- [0125] 한편, 진단대상 배관(P)의 길이방향, 즉 좌우로 유도 초음파를 발생시키기 위해, 압전소자 센서 모듈의 링(Ring)을 1set라 할 때 이는 2줄(또는 2겹)의 링으로 구성할 수 있다.
- [0126] 반사신호 입력단계는 최적신호 인가단계(S200)로부터 인가된 최적신호가 진단대상 배관(P)의 임의의 지점으로부터 반사되어 생성된 적어도 하나 이상의 반사신호를 입력받을 수 있다(S300). 이는 진단대상 배관(P)의 고장위치 및 고장정도를 예측하기 위해 이용되는 신호를 입력받기 위한 단계로서, 최적신호를 진단대상 배관(P)에 인가하였을 때 임피던스 불연속점에서 반사되어 돌아오는 반사신호를 입력받을 수 있다.
- [0127] 고장 예측단계는 반사신호 입력단계(S300)로부터 입력받은 적어도 하나 이상의 반사신호에 기초하여 진단대상 배관(P)의 고장위치 및 고장정도를 예측할 수 있다(S400). 이는 비파괴적으로 진단대상 배관(P)의 고장위치 및 고장정도를 예측할 수 있는 단계라 할 수 있다.
- [0128] 보다 상세하게, 도 6을 참조하면 고장 예측단계(S400)는 시간-주파수 변환단계(S410), 고장위치 및 고장정도 예측단계(S430)를 포함하여 진단대상 배관(P)의 고장을 예측할 수 있다.
- [0129] 시간-주파수 변환단계는 반사신호 입력단계(S300)로부터 입력받은 적어도 하나 이상의 반사신호를 시간-주파수 영역으로 변환할 수 있다(S410). 이는 고장 예측의 정확도 및 유리한 분해능을 위한 단계라 할 수 있다.
- [0130] 고장위치 및 고장정도 예측단계는 시간-주파수 변환단계(S410)로부터 변환된 시간-주파수 영역을 상호상관함수로 분석하여 진단대상 배관(P)의 고장위치 및 고장정도를 예측할 수 있다(S430). 이 또한 고장 예측의 정확도 및 유리한 분해능을 위한 단계라 할 수 있다.
- [0131] 보다 상세하게 시간-주파수 영역 반사 측정에는 GELC 전압신호 인가, 반사신호 측정, 시간 영역의 반사신호를 시간-주파수 영역으로 변환, 시간-주파수 영역에서 기준신호와 반사신호 간의 유사도를 상호상관함수 비교를 통해 결함의 위치를 추정할 수 있다. 이 때 측정대상에 인가한 신호인 기준신호와, 반사신호 간의 유사도를 비교하는 것은 시간 영역에서 비교하는 것보다 시간-주파수 영역에서 비교하는 것이 고장 예측의 정확도가 더 높고 분해능에 있어서도 더 유리한 이점을 가질 수 있다. 이에 시간-주파수 변환단계(S410)에서는 반사신호 입력단계(S300)로부터 입력받은 적어도 하나 이상의 반사신호를 시간-주파수 영역으로 변환하고, 고장위치 및 고장정도 예측단계(S430)는 시간-주파수 변환단계(S410)로부터 변환된 시간-주파수 영역을 상호상관함수로 분석하여 진단대상 배관(P)의 고장위치 및 고장정도를 예측할 수 있다.
- [0132] 도 7a는 본 발명의 실시예로서, 최적신호 설계 및 최소 전단형 압전소자 개수 결정 시 활용되는 진단대상 배관(P)의 유도 초음파 군속도 그래프를 나타낸 도면이고, 도 7b는 본 발명의 실시예로서, 최적신호 설계 시 활용되는 반사신호 유사도 그래프를 나타낸 도면이다.
- [0133] 도 7a를 참조하면, 진단대상 배관(P)의 유도 초음파 군속도 그래프는 최종 중심주파수 값을 산출하기 위한 기 설정된 중심주파수 범위 중, 최대 중심주파수 값을 결정하기 위한 그래프라 할 수 있다.
- [0134] 예를 들어, 진단대상 배관(P)에 결착 가능한 링 형태의 압전소자 개수가 10개일 경우, $F(10(\text{압전소자 개수}), 2)$ 의 cut-off frequency는 약 250kHz로서 최대 중심주파수 값은 250kHz라 할 수 있다.
- [0135] 최소 중심주파수 값의 경우, 산출된 중심주파수 폭 값(BW)을 $n(\text{Hz})$ 라 하면, 이론적으로 생성 가능한 최소 중심주파수 값은 ‘최소 중심주파수 값 = $n/2(\text{Hz})$ ’로부터 산출할 수 있다.
- [0136] 이를 통해 산출된 최소 중심주파수 값과 최대 중심주파수 값 사이가 기 설정된 중심주파수 범위라 할 수 있다. 그리고 산출된 중심주파수 폭 값(BW) 및 산출된 지속시간 값(TD)을 고정된 상태로 또는 기준으로, 중심주파수들 기 설정된 중심주파수 범위에서 스위프(Sweep)하면서 진단대상 배관(P)에 적용할 수 있다.

- [0137] 그리고 도 7b에 도시된 바와 같이 기 설정된 중심주파수 범위에서 스윙된 중심주파수는 시간-주파수 영역 반사 측정법(TFDR)의 상호상관함수 계산을 통해 진단대상 배관(P)의 종단점에서 반사신호 유사도가 가장 높은 신호를 최종 중심주파수 값(CF)으로 도출할 수 있다.
- [0138] 도 7b의 결과를 바탕으로 중심주파수(CF) 80kHz 및 주파수폭(BW) 60kHz의 신호를 사용한다면(즉, 신호의 중심주파수 대역은 50~110kHz), 최대 중심주파수인 110kHz에 걸리지 않아야하므로 최소 5개의 전단형 압전소자를 사용할 수 있다. 그 이유는 F(5,2)의 cut-off frequency가 약 120kHz이기 때문이다. 이 때 5개라는 개수는 순수한 비틀림 모드의 유도 초음파 최적신호를 발생시키기 위한 이론적인 개수로서, 실제 진단대상 배관(P)에 적용할 때의 노이즈, 부착의 정확성 등에 의해 오차가 더 많이 발생할 것을 고려하면 더 많은 압전소자를 부착해야할 수 있다. 즉, 압전소자의 개수가 많아질수록 순수한 비틀림 모드의 유도 초음파 최적신호를 만드는 데에 유리하다 할 수 있다. 결론적으로, 링 형태로 다수의 압전소자를 부착하는 것은 순수한 비틀림 모드의 유도 초음파 최적신호를 발생시키기 위한 것이라 할 수 있다. 이와 같이 링 형태로 부착된 다수의 압전소자는 순수한 비틀림 모드의 유도 초음파 최적신호를 발생시킬 뿐만 아니라, 진단대상 배관(P)의 원주 방향에서 고장위치를 예측할 수 있다.
- [0139] 도 8a 및 도 8b는 본 발명의 실시예에 따른 압전소자 센서 모듈을 나타낸 도면이고, 도 8c는 본 발명의 실시예에 따라 진단대상 배관(P) 외측 표면 원주 방향을 따라 링 형태로 압전소자 센서 모듈을 부착한 형태를 나타낸 도면이다.
- [0140] 도 8a 내지 도 8c를 참조하면, 본 발명은 압전소자의 특성을 고려하여 진단대상 배관(P) 외측 표면에 부착할 수 있다. 이 때 압전소자의 특성은 크기 및 두께가 포함될 수 있으며, 이를 고려하여 최대로 부착할 수 있는 압전소자는 13개 내지 15개로 할 수 있다. 한편, 압전소자의 부착은 진단대상 배관(P)의 길이, 두께 등을 포함하는 규격에 적합하게 체결 및 분해 등 조절이 가능하도록 별도의 접착제를 이용하지 않을 수 있다.
- [0141] 도 9를 참조하면, 본 발명은 진단 장비 체결의 용이성과 넓은 범위의 결함 위치 커버를 위해 최적신호를 설계하는 최적신호 설계부(100)와, 설계된 최적신호를 발생시키는 최적신호 인가부(200)와, 고장을 진단하는 반사신호 입력부(300) 및 고장 예측부(400)의 위치를 통합시킬 수 있다. 그 결과, 본 발명에 따른 반사파 처리방법으로 고장 진단을 하기 위해, 최적신호 인가에 따른 고장 예측 결과가 신호 감쇠 없이 도출될 수 있는 것을 확인할 수 있다. 또한, 상기와 같은 구성요소들의 위치 통합은 진단 장비 체결이 용이하며, 넓은 범위에 있어서도 고장 위치 진단 커버가 가능한 효과를 가질 수 있다.
- [0142] 즉, 본 발명은 최적신호 설계부(100), 최적신호 인가부(200), 반사신호 입력부(300) 및 고장 예측부(400)의 위치 통합으로 진단 장비 체결이 용이하며, 넓은 범위에 있어서도 고장위치 진단 커버가 가능한 효과를 가질 수 있다. 또는 같은 의미로 달리 표현하자면 ‘신호발생과, 측정, 및 링(Ring) 형태의 전단형 압전소자 2set ‘를 진단모듈 1set로 위치를 통합시킬 수 있다. 이 때 진단모듈 1set라 하면, 본 발명의 배관 고장 예측 장치라 할 수 있다.
- [0143] 도 10은 본 발명의 실시예로서 진단대상 배관의 길이가 5m일 때 3m 지점에서 발생한 결함을 크기별(Level)로 나타낸 도면이고, 도 10a는 본 발명의 실시예로서 정상상태의 진단대상 배관 결과를 나타낸 도면이고, 도 10b는 도 10에 따른 결함 레벨 1의 결과 나타낸 도면이고, 도 10c는 도 10에 따른 결함 레벨 2의 결과를 나타낸 도면이고, 도 10d는 도 10에 따른 결함 레벨 3의 결과를 나타낸 도면이다.
- [0144] 이 때 a는 유도 초음파를 시간 영역에서 측정한 그래프이다. 유도초음파는 전압 신호로, (ring 형태의 전단형 압전소자 모듈로부터) 변환되어 디지털 오실로스코프(전압을 측정하는 기계)에서 계측하여 취득할 수 있다. 여기서 a는 디지털 오실로스코프에서 측정한 그래프에서 시간을 거리로 환산하여 나타낸 그래프로서, 시간에서 거리는 유도초음파의 전파속도로 간단하게 환산할 수 있다.
- [0145] b는 시간-주파수 영역에서 기준신호(인가하는 최적신호)와 반사신호 간의 유사도를 보여주는 상호상관함수 그래프이다. 0m 지점은 신호를 인가를 한 부분이기 때문에 매우 높은 유사도가 나타나며, 5m 지점은 종단 지점이기 때문에 매우 큰 반사 신호가 발생하므로 높은 유사도가 나타날 수 있다. 10m 지점은 5m 지점의 다중 반사신호인데, 이 때 다중 반사신호는 반사되어 돌아온 신호가 다시 반사되어 전파되기 때문에 계측되는 신호라 할 수 있다. 신호를 길게 계측하면 5m, 10m, 15m, 20m, ... 의 위치에 다중 반사신호가 계측될 수 있다.
- [0146] 이를 기초로 도 10, 도 10a 내지 도 10d를 참조하면, 진단대상 배관(P)의 길이가 총 5m일 때 3m 지점에 결함을 발생시켜나가면서 얻은 결과값이라 할 수 있다. (10a: 정상상태, 10b: Level 1의 결함, 10c: Level 2의 결함, 10d: Level 3의 결함) 반사파계측법은 임피던스의 불연속지점에서 발생한 반사신호를 계측 후 분석하여 결함의

위치를 추정하는데, 결함이 존재하지 않는 5m의 배관을 대상으로 진단을 할 경우, 임피던스 불연속지점은 5m 지점 (완전한 불연속지점) 1곳이라 할 수 있다.

[0147] 이를 기초로 보면, 도 10a 및 b는 종단점인 5m 이외에 반사신호가 계측되지 않은 반면, 도 10c 및 d는 종단점 이외에도 3m 지점에서 반사신호가 계측되었다 할 수 있다. 이 때 도 10c 및 d에서 3m 지점의 상호상관함수, 즉 3m 지점에서 발생한 반사신호와 기준신호(인가하는 최적신호) 간의 유사도를 보았을 때, 도 10d가 더 큰 유사도를 보이는 이유는 결함의 크기가 도 10c보다 크기 때문이다. 결함의 크기가 클수록 더 크고 유사한 반사신호가 발생할 수 있다. 반면 도 10b에서 반사신호가 계측되지 않은 이유는 결함의 크기가 워낙 작기 때문이다. 실제로 도면 10의 Level 1의 경우 타 결함 대비 매우 작은 결함임을 확인할 수 있다.

[0148] 나아가 도 10c 및 d에서 전압신호로 보면 3m 지점의 결함에서 발생한 반사신호의 크기는 매우 작으나, 시간-주파수 영역에서 유사도를 비교할 경우 매우 큰 유사도를 가지는 것을 확인할 수 있다. 이는 반사신호를 시간-주파수 영역에서 분석하는 이유라 할 수 있다.

[0149] 도 11은 본 발명의 실시예로서 압전소자 센서 모듈이 부착된 진단대상 배관(P)의 단면도이다.

[0150] 도 11을 참조하면, 압전소자 센서(S) 모듈을 12개의 진단형 압전소자로 구성할 경우, 링(Ring) 형태의 압전소자 센서(S) 모듈을 4개의 zone으로 나누어 각각 측정된 반사신호의 특징을 분석하여 원주방향의 고장위치를 예측하는 것이라 할 수 있다. 이 때 4개의 zone에서 각각 측정된 반사신호의 특징은 TF Signature를 통한 AI 분류기 등을 이용하는 등의 방법을 이용하여 고장위치를 예측할 수 있다. 한편, zone의 개수는 진단 환경 등에 따라 다양하게 변경될 수 있다.

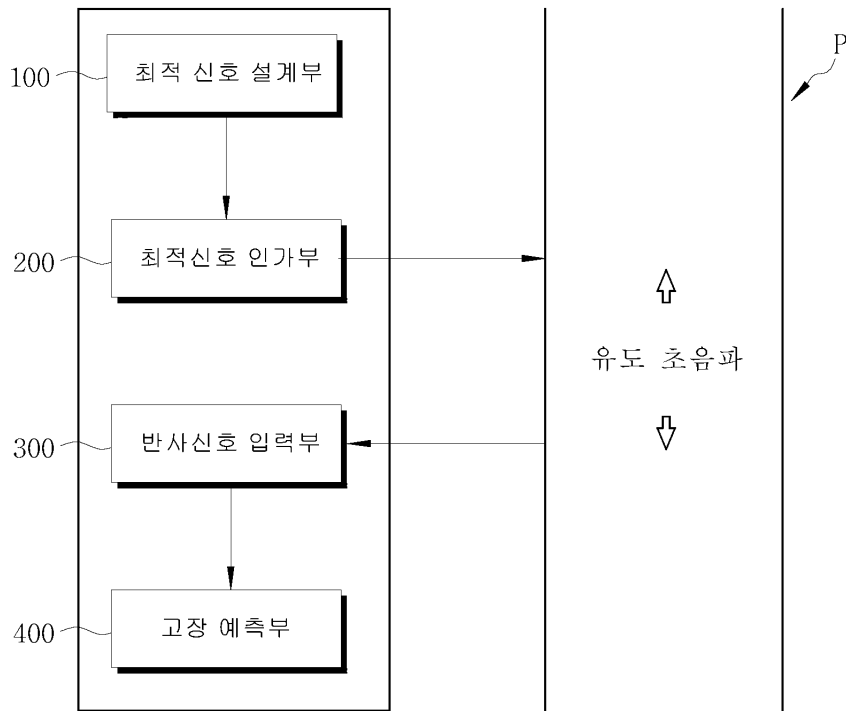
[0151] 이상에서 본 발명의 기술적 사상을 예시하기 위한 바람직한 실시예와 관련하여 설명하고 도시하였지만, 본 발명은 이와 같이 도시되고 설명된 그대로의 구성 및 작용에만 국한되는 것이 아니며, 기술적 사상의 범주를 일탈함이 없이 본 발명에 대해 다수의 변경 및 수정이 가능함을 당업자들은 잘 이해할 수 있을 것이다. 따라서 그러한 모든 적절한 변경 및 수정들도 본 발명의 범위에 속하는 것으로 간주되어야 할 것이다.

부호의 설명

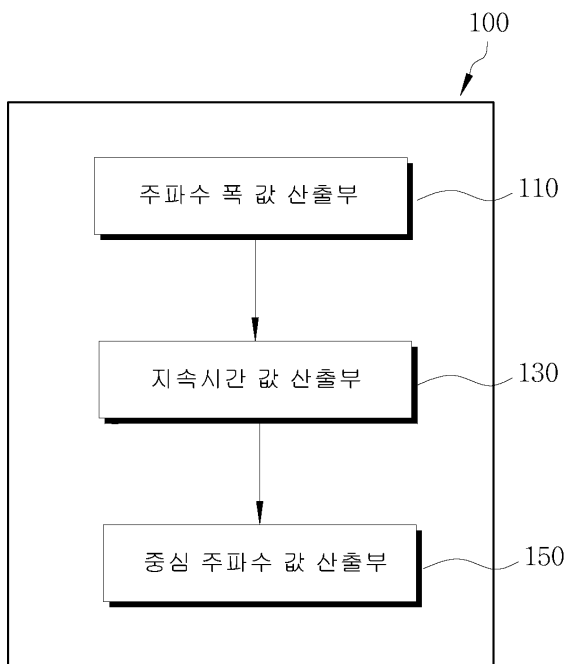
[0152] 100 : 최적신호 설계부 110 : 주파수 폭 값 산출부
130 : 지속시간 값 산출부 150 : 중심주파수 값 산출부
200 : 최적신호 인가부 300 : 반사신호 입력부
400 : 고장 예측부 410 : 시간-주파수 변환부
430 : 고장위치 및 고장정도 예측부
P : 진단대상 배관 S : 압전소자 센서

도면

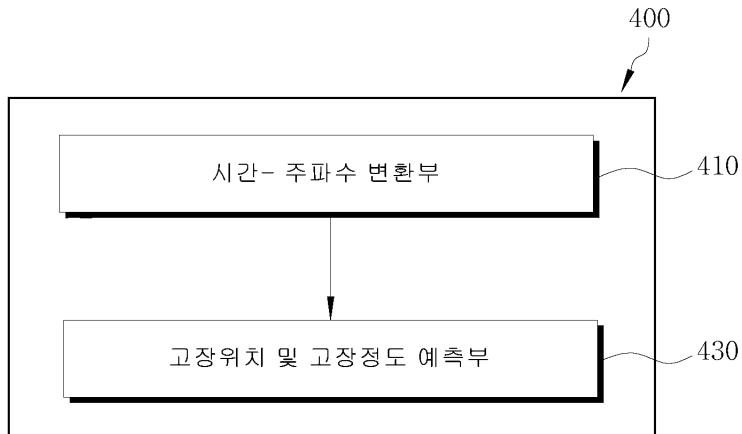
도면1



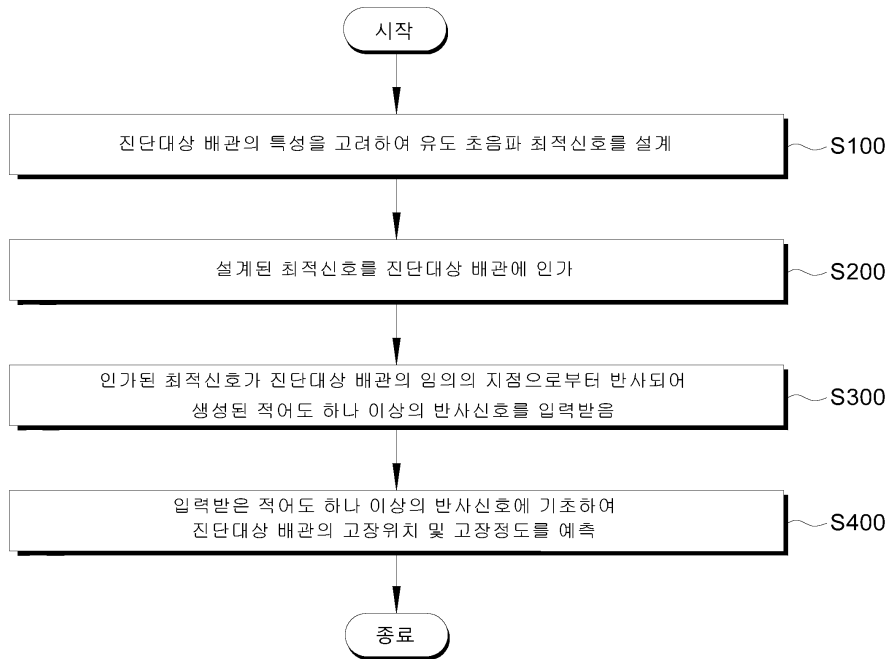
도면2



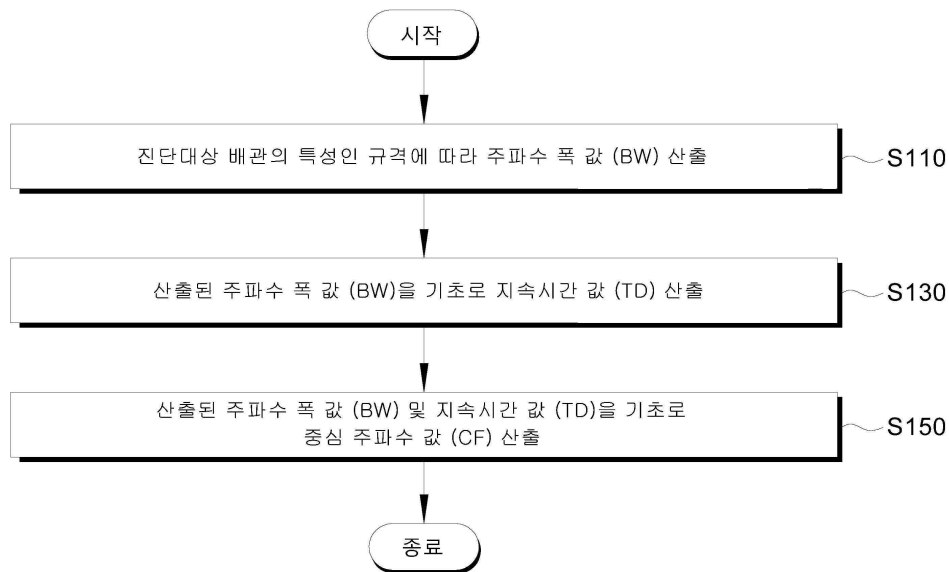
도면3



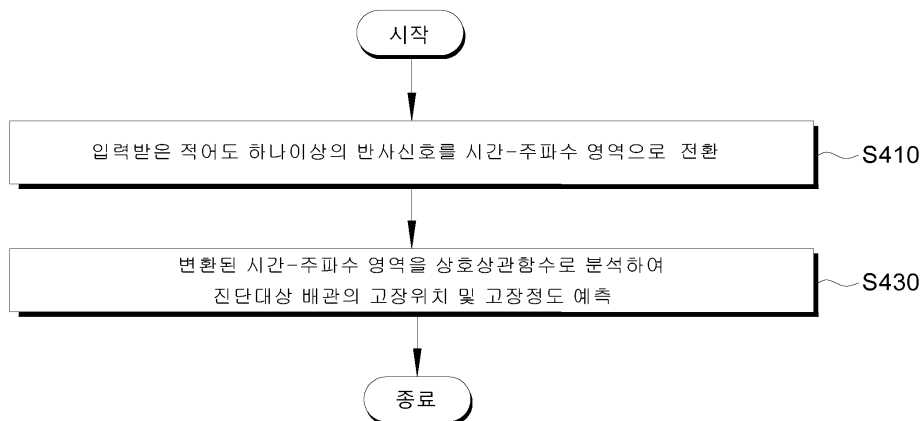
도면4



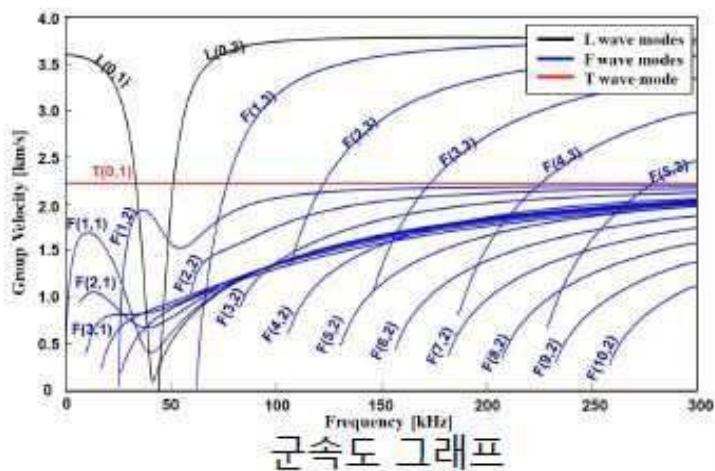
도면5



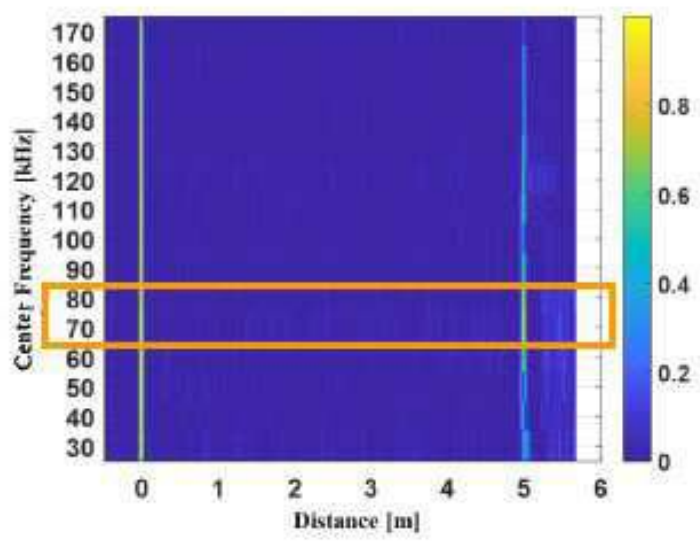
도면6



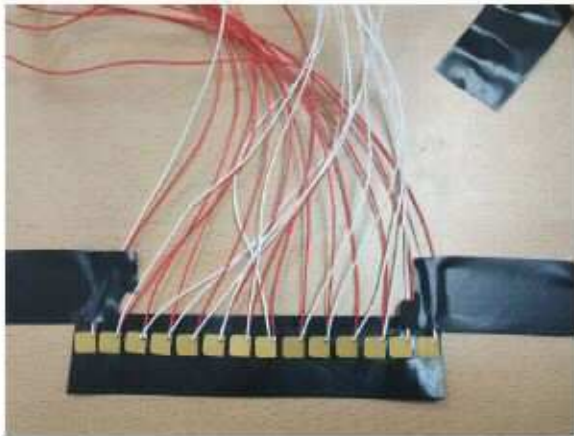
도면7a



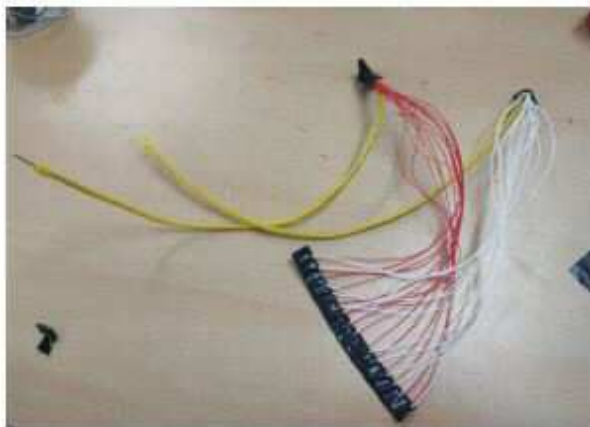
도면7b



도면8a



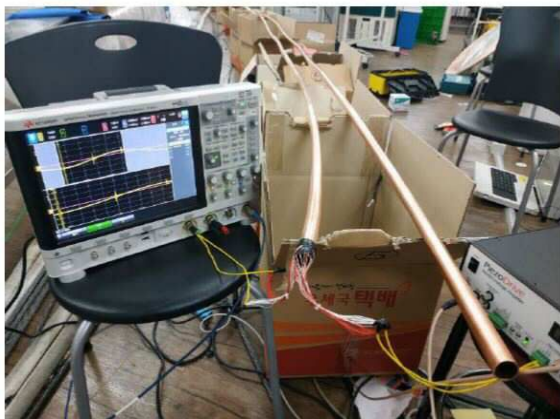
도면8b



도면8c



도면9



도면10



Level 1

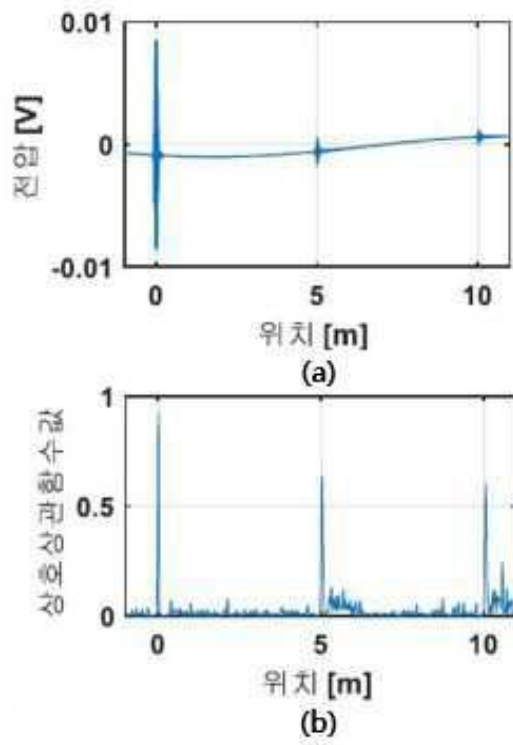


Level 2

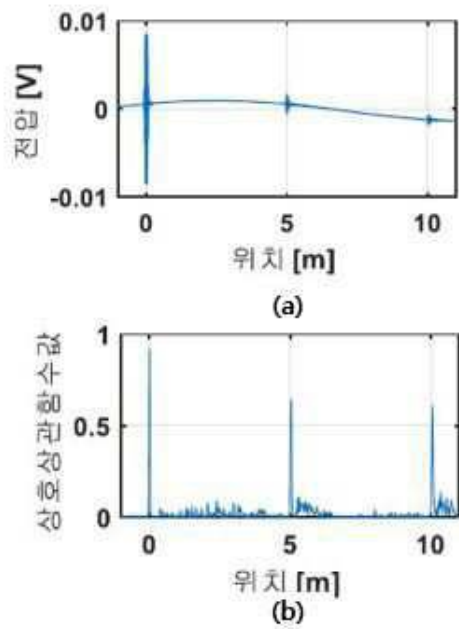


Level 3

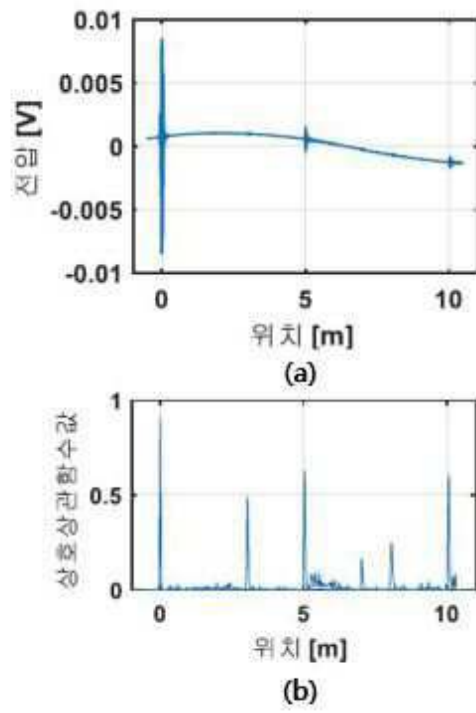
도면10a



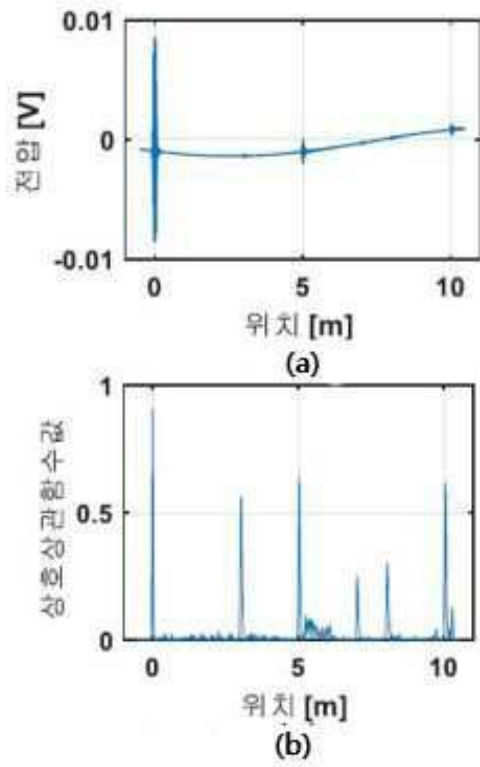
도면10b



도면10c



도면10d



도면11

