(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2011-0039067
(43) 공개일자 2011년04월15일

(51) Int. Cl.
*G01M 3/24* (2006.01) *G01N 29/36* (2006.01)
*G01N 29/44* (2006.01)
(21) 출원번호 10-2009-0096344
(22) 출원일자 2009년10월09일
심사청구일자 2009년10월09일

(71) 출원인
**인하대학교 산학협력단**
인천 남구 용현동 253 인하대학교
(72) 발명자
**이상권**
서울특별시 강남구 대치동 청실아파트 16동 901호
**김민수**
경기도 용인시 수지구 죽전동 875-4 이지뷰 26동 303호
**김의열**
대구광역시 북구 관음동 1273-10
(74) 대리인
**특허법인태백**

전체 청구항 수 : 총 5 항

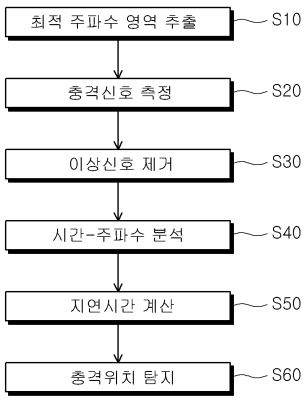
# (54) 배관의 충격 위치 탐지방법

## (57) 요 약

본 발명은, 지하에 매설된 실제배관 내부의 음향 특성을 고려하여 충격음 신호의 왜곡이 최소화되는 주파수 영역을 추출하는 최적 주파수 영역 추출단계; 위치를 알고 있는 제1센서 및 제2센서에서 실제배관의 충격음 신호를 각각 측정하는 충격신호 측정단계; 제1센서 및 제2센서에서 측정된 각각의 충격음 신호에서 왜곡된 이상신호를 각각 여과하여 제거하는 이상신호 제거단계; 왜곡된 이상신호가 각각 제거된 충격음 신호에 대해, 최적 주파수 영역 추출단계에서 추출된 최소 왜곡의 주파수 영역에서 시간-주파수 분석을 하는 분석단계; 충격음 신호가 제1센서 및 제2센서에 각각 전달된 시간의 차이를 계산하는 지연시간 계산단계; 및 제1센서 및 제2센서의 위치와 지연시간을 이용하여 충격 위치를 탐지하는 위치 탐지단계를 포함하는 배관의 충격 위치 탐지방법을 제공한다.

본 발명에 의한 배관의 충격 위치 탐지방법에 의하면, 실제 배관 내부의 음향특성을 고려하여 충격신호의 왜곡이 최소화된 주파수영역을 활용하고, 연속 웨이블렛 변환을 이용하여 보다 높은 분해능을 가진 정보를 얻을 수 있기 때문에, 충격 위치를 탐지할 때 보다 적은 오차의 결과를 얻을 수 있다.

*대 표 도* - 도2



## *특허청구의 범위*

### 청구항 1

지하에 매설된 실제배관(10) 내부의 음향 특성을 고려하여 충격음 신호의 왜곡이 최소화되는 주파수 영역을 추출하는 최적 주파수 영역 추출단계(S10);

위치를 알고 있는 제1센서(20) 및 제2센서(30)에서 상기 실제배관(10)의 충격음 신호를 각각 측정하는 충격신호 측정단계(S20);

상기 제1센서(20) 및 제2센서(30)에서 측정된 각각의 충격음 신호에서 왜곡된 이상신호를 각각 여과하여 제거하는 이상신호 제거단계(S30);

왜곡된 이상신호가 각각 제거된 충격음 신호에 대해, 상기 최적 주파수 영역 추출단계(S10)에서 추출된 최소 왜곡의 주파수 영역에서 시간-주파수 분석을 하는 분석단계(S40);

상기 분석단계(S40)에서 분석된 결과를 이용하여 충격음 신호가 상기 제1센서(20) 및 제2센서(30)에 각각 전달된 시간의 차이($\Delta t$)를 계산하는 지연시간 계산단계(S50); 및

상기 제1센서(20) 및 제2센서(30)의 위치와 상기 지연시간($\Delta t$)을 이용하여 충격 위치를 탐지하는 위치 탐지단계(S60)를 포함하는 배관의 충격 위치 탐지방법.

### 청구항 2

청구항 1에 있어서, 상기 최적 주파수 영역 추출단계(S10)는,

실제배관(10)의 음향 특성에 대응하는 실험배관을 준비하는 실험배관 준비단계(S11)와,

실제배관(10) 내를 유동하는 유체의 음향 전파속도를 정의하는 음향 전파속도 정의단계(S12)와,

충격 신호의 발생 위치 및 실험용 센서들의 위치를 알고 있는 상태에서, 상기 실험배관에 충격을 가하여 충격음 신호를 측정하는 실험용 충격신호 측정단계(S13)와,

상기 실험용 충격신호 측정단계(S13)에서 측정된 충격음 신호를 구간으로 설정된 다수의 주파수 영역에서 시간-주파수 분석을 하는 분석단계(S14);

상기 분석단계(S14)에서 분석된 결과를 이용하여, 구간으로 설정된 각 주파수 영역에서 유체의 음향 전파속도를 계산하는 음향 전파속도 계산단계(S15)와,

상기 음향 전파속도 계산단계(S15)에서 계산된 음향 전파속도와 상기 음향 전파속도 정의단계(S12)에서 정의된 음향 전파속도의 차이가 최소가 되는 것으로, 음향전파 특성의 왜곡이 최소화된 주파수 영역을 선정하는 최적 주파수 영역 선정단계(S16)를 포함하는 배관의 충격 위치 탐지방법.

### 청구항 3

청구항 2에 있어서,

상기 분석단계(S14)의 시간-주파수 분석은 연속 웨이블렛 변환(Continuous Wavelet Transform;CWT)을 이용하는 배관의 충격 위치 탐지방법.

### 청구항 4

청구항 2에 있어서,

상기 실제배관(10)을 상기 실험배관으로 대체하여 사용하는 배관의 충격 위치 탐지방법.

### 청구항 5

청구항 1 내지 청구항 4 중 어느 한 청구항에 있어서,

상기 분석단계(S40)의 시간-주파수 분석은 연속 웨이블렛 변환(Continuous Wavelet Transform;CWT)을 이용하는 배관의 충격 위치 탐지방법.

# 명 세 서

## 발명의 상세한 설명

### 기 술 분 야

[0001] 본 발명은 충격 위치 탐지방법에 관한 것으로서, 보다 상세하게는 지하에 매설된 배관을 흐르는 유체가 누설되어 발생하는 충격신호를 측정하여, 유체의 누설이 발생한 충격위치를 추정하는 충격 위치 탐지방법에 관한 것이다.

### 배 경 기 술

[0002] 매설되어 있는 파이프(Pipe)와 같은 배관에서의 가스 누출은 폭발의 위험성이 있을 뿐만 아니라, 경제적으로는 에너지 손실을 초래하기 때문에 매설되어 있는 배관의 손상으로 인한 누출 위치를 신속히 찾는 것은 매우 중요한 일이다.

[0003] 일반적으로 배관의 누출 위치를 찾는 방법은, 배관에서 누출되는 열수가 지하에서 열층을 형성하고 확산되어 지표에 도달할 때 열 추적 카메라로 촬영하여 지표의 열 분포 상태를 판독하고 누출지점을 확인하는 열 분포 사진 분석법(Thermograph), 임펄스 레이더의 반사작용을 응용하여 누출지점을 확인하는 임펄스 측정방법(Impulse measurement), 배관 내부에 감지회로를 내장하여 수분의 침투 또는 회로의 단락을 저항 비교 측정기를 이용하여 결함부의 위치를 확인하는 저항 측정방법(Resistivity measurement) 등이 있다.

[0004] 상기 열 분포 사진 분석법은, 배관 내부에 고온의 유체가 존재하는 경우로 한정되고, 만일 그 유체가 위험물질인 경우에는 사후 처리에 많은 어려움이 있다. 그리고 열 분포의 특성을 살펴야 한다는 측면에서 누출의 탐지범위가 매우 국부적인 한계를 갖는다.

[0005] 상기 임펄스 측벙방법과 저항 측정방법은, 배관의 제작에 있어서 임펄스 신호를 측정하는 알람 와이어(Alarm wire)를 함께 설치해야 한다는 측면이 있기 때문에 비용 문제가 발생한다. 또한 와이어의 길이 문제가 발생하여, 일반적으로는 대략 1000m 정도마다 새로운 와이어를 사용해야 한다. 그리고 매설된 후에 와이어가 손상된 경우, 이를 연결하는데 있어서 여러 어려움이 뒤 따른다.

[0006] 도 1에는 위와 같은 문제점을 해결하기 위한 종래 상관관계기법에 의한 배관의 충격 위치 탐지방법을 설명하기 위한 참고도가 도시되어 있다.

[0007] 도면을 참조하면, 상기 상관관계방법(Correlation method)은, 배관의 임의의 두 측정 지점(S1,S2) 간에서 누출이 발생하는 음파를 측정하여 측정지점(S1,S2)까지 음파가 도달하는 시간차(△t =|t2-t1|)를 분석하여 누출지점을 확인하는 방법이다.

[0008] 그런데 위와 같은 종래 상관관계방법은, 모든 주파수의 정보를 포함하고 있는 시간 데이터를 참조하여 위치를 계산한다. 만약 누출에 의하여 발생하는 음파가 모든 주파수 영역에 대해 평면파(Plane wave)의 특성을 가지고, 일정한 전파속도를 가지고 있다면 매우 정확한 위치 추정이 가능해질 수 있다.

[0009] 그러나 실제 배관의 음향 전파의 특성은 음향모드(Acoustic mode), 차단주파수(Cut-off frequency) 및 분사파(Dispersive wave) 특성 등에 의해 초기 충격파 신호가 전파되면서 왜곡되는 현상이 발생한다. 즉, 배관 내부의 유체 흐름과 음향 전파의 특성이 고려되지 않고 왜곡된 신호를 기준으로 충격 위치를 추정하게 되어 실제와는 많은 오차가 발생하게 된다.

### 발명의 내용

#### 해결 하고자하는 과제

[0010] 본 발명은 상기한 문제점을 해결하기 위하여 창출된 것으로, 실제 배관의 음향 전파의 특성을 고려하여 오차가 최소화된 충격음 발생위치를 탐지할 수 있는 배관의 충격위치 탐지방법을 제공하는데 그 목적이 있다.

#### 과제 해결수단

[0011] 본 발명은 지하에 매설된 실제배관 내부의 음향 특성을 고려하여 충격음 신호의 왜곡이 최소화되는 주파수 영역을 실험적으로 추출하는 최적 주파수 영역 추출단계; 위치를 알고 있는 제1센서 및 제2센서에서 상기 실제배관

의 충격음 신호를 각각 측정하는 충격신호 측정단계; 상기 제1센서 및 제2센서에서 측정된 각각의 충격음 신호에서 왜곡된 이상신호를 각각 여과하여 제거하는 이상신호 제거단계; 왜곡된 이상신호가 각각 제거된 충격음 신호에 대해, 상기 최적 주파수 영역 추출단계에서 추출된 최소 왜곡의 주파수 영역에서 시간-주파수 분석을 하는 분석단계; 충격음 신호가 상기 제1센서 및 제2센서에 각각 전달된 시간의 차이를 계산하는 지연시간 계산단계; 및 상기 제1센서 및 제2센서의 위치와 상기 지연시간을 이용하여 충격 위치를 탐지하는 위치 탐지단계를 포함하는 배관의 충격 위치 탐지방법을 제공한다.

[0012] 상기 최적 주파수 영역 추출단계는, 실제배관의 음향 특성에 대응하는 실험배관을 준비하는 실험배관 준비단계와, 실제배관 내를 유동하는 유체의 음향 전파속도를 정의하는 음향 전파속도 정의단계와, 충격 신호의 발생 위치 및 실험용 센서들의 위치를 알고 있는 상태에서, 상기 실험배관에 충격을 가하여 충격음 신호를 측정하는 실험용 충격신호 측정단계와, 상기 실험용 충격신호 측정단계에서 측정된 충격음 신호를 구간으로 설정된 다수의 주파수 영역에서 시간-주파수 분석을 하는 분석단계; 상기 분석단계에서 분석된 결과를 이용하여, 구간으로 설정된 각 주파수 영역에서 유체의 음향 전파속도를 계산하는 음향 전파속도 계산단계와, 상기 음향 전파속도 계산단계에서 계산된 음향 전파속도와 상기 음향 전파속도 정의단계에서 정의된 음향 전파속도의 차이가 최소가 되는 것으로, 음향전파 특성의 왜곡이 최소화된 주파수 영역을 선정하는 최적 주파수 영역 선정단계를 포함할 수 있다.

[0013] 상기 분석단계의 시간-주파수 분석은, 바람직하게는 연속 웨이블렛 변환(Continuous Wavelet Transform;CWT)을 이용할 수 있다.

[0014] 또한 상기 실제배관을 상기 실험배관으로 대체하여 사용할 수도 있다.

## 효 과

[0015] 본 발명에 의한 배관의 충격 위치 탐지방법에 의하면, 실제 배관 내부의 음향특성을 고려하여 충격신호의 왜곡이 최소화된 주파수영역을 활용하고, 연속 웨이블렛 변환을 이용하여 보다 높은 분해능을 가진 정보를 얻을 수 있기 때문에, 충격 위치를 탐지할 때 보다 적은 오차의 결과를 얻을 수 있다.

## 발명의 실시를 위한 구체적인 내용

[0016] 이하 첨부된 도면을 참조하면서 본 발명에 따른 바람직한 실시예를 상세히 설명하기로 한다. 이에 앞서, 본 명세서 및 청구범위에 사용된 용어나 단어는 통상적이거나 사전적인 의미로 한정해서 해석되어서는 아니 되며, 발명자는 그 자신의 발명을 가장 최선의 방법으로 설명하기 위해 용어의 개념을 적절하게 정의할 수 있다는 원칙에 입각하여, 본 발명의 기술적 사상에 부합하는 의미와 개념으로 해석되어야만 한다.

[0017] 도 2는 본 발명의 실시예에 따른 배관의 충격 위치 탐지방법을 나타낸 흐름도이고, 도 3은 도 2에 나타낸 최적 주파수 영역 추출단계를 설명하기 위한 흐름도이다.

[0018] 도 2를 참조하면, 발명의 실시예에 따른 배관의 충격 위치 탐지하기 위해서는, 지하에 매설된 실제배관(10;도 1참조) 내부의 음향 특성을 고려하여 충격음 신호의 왜곡이 최소화되는 최적의 주파수 영역을 추출한다(S10). 충격음 신호의 왜곡이 최소화되는 최적의 주파수 영역을 추출 방법에 대해서는 후술하도록 한다.

[0019] 다음으로, 위치를 알고 있는 제1센서(20;도 1 참조) 및 제2센서(30;도)에서 상기 실제배관(10)의 충격음 신호를 각각 측정한다(S20).

[0020] 상기 실제배관(10)의 충격음 신호가 측정되면, 상기 제1센서(20) 및 제2센서(30)에서 측정된 각각의 충격음 신호에서 왜곡된 이상신호를 각각 여과하여 제거한다(S30). 여기서 측정된 충격음 신호에서 이상신호를 여과하는 이유는, 분사파의 영향으로 생기는 음향의 왜곡현상을 없애주기 위함이다.

[0021] 그 다음으로 왜곡된 이상신호가 각각 제거된 충격음 신호에 대해, 상기 최적 주파수 영역 추출단계(S10)에서 추출된 최소 왜곡의 주파수 영역에서 시간-주파수 분석을 수행한다(S40). 여기서 상기 분석단계(S40)의 시간-주파수 분석은 연속 웨이블렛 변환(Continuous Wavelet Transform;CWT)을 이용하는 것이 바람직하다.

[0022] 일반적으로 진동 및 소음 신호를 분석하는 과정에서는, 아래 수학식 1과 같이 임의의 형태를 가진 신호를 사인과 코사인의 합으로 표현할 수 있다는 개념의 푸리에 변환 (Fourier Transform)이 널리 사용되고 있으며 연속성을 가진 신호에 대해 적합한 변환 기법이다.

[0023] 수학식 1

$$f(x) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos kx + b_k \sin kx)$$

[0024]

[0025] 하지만, 충격 신호와 같이 변동이 심하거나 불연속적인 신호의 경우에는 기존의 사인과 코사인을 근사 함수로 사용하는 것은 부적합하다. 그래서 날카로운 불연속성을 가진 신호를 근사하기 위한 방법으로, 아래의 수학식 2와 같은 모 웨이블렛 (mother wavelet) 함수라고 부르는 여러 형태의 근사 함수를 사용되고 있다. 웨이블렛 변환의 활용은 기존의 주파수 분석(frequency analysis) 개념이 스케일 분석(scale analysis)이라는 개념으로 전환되는 계기가 되었다. 즉, 모 웨이블렛의 크기가 스케일에 의존하여 변화하면서 동일한 신호에 근사 함수로 적용이 되는데 그 결과 서로 다른 시간-주파수 분해능을 가지는 결과를 동시에 얻을 수 있게 된다.

[0026] 수학식 2

$$CWT_x^{\psi} = \psi_x^{\psi}(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int x(t) \psi^* \left( \frac{t-\tau}{s} \right) dt$$

[0027]

[0028] 일반적으로 고주파 영역에서 모 웨이블렛 크기를 작게 하여 시간 분해능을 증가시키고, 저주파 영역에서는 모 웨이블렛 크기를 크게 하여 주파수 분해능을 증가시킨다. 그러나 웨이블렛 변환 또한 불확실성의 원리에 의해 시간과 주파수 사이에 양립된 관계를 유지하고 있다. 제한된 시간-주파수 분해능을 가지는 퓨리에 변환 기법과 달리 웨이블렛 변환 기법은 동시에 다양한 시간-주파수 분해능을 가지면서 충격 신호와 같이 변동이 심하거나 불연속적인 신호의 경우에도 명확한 분석을 할 수 있다는 측면에서 다양한 분야에서 활용되고 있는 신호처리 기법 중 하나이다.

[0029] 시간-주파수 분석을 수행 끝나면(S40), 상기 분석단계(S40)에서 분석된 결과를 이용하여 충격음 신호가 상기 제1센서(20) 및 제2센서(30)에 각각 전달된 시간의 차이(Δt)를 계산한다(S50).

[0030] 끝으로, 상기 제1센서(20) 및 제2센서(30)의 위치와 상기 지연시간(Δt)을 이용하여 충격 위치를 탐지하는 위치탐지한다(S60). 즉, 상기 제1센서(20) 및 제2센서(30)의 위치와 지연시간(Δt)을 알 수 있으므로, 이들로부터 실제 충격음이 발생한 위치를 추정하여 탐지할 수 있다.

[0031] 이하 첨부된 도 3을 참조하여, 상기 최적 주파수 영역 추출단계(S10)를 설명하도록 한다.

[0032] 최적의 주파수 영역을 추출하기 위해서는, 실제배관(10)의 음향 특성에 대응하는 실험배관을 준비한다(S11). 여기서 실험배관은 실제배관(10)에 적합하도록 별도로 마련할 수 있으나, 실제배관(10)을 실험배관으로 대체하여 사용할 수도 있다.

[0033] 다음으로 실제배관(10) 내를 유동하는 유체의 음향 전파속도를 정의하는 음향 전파속도를 정의한다. 예를 들면, 지하에 매설된 가스 배관의 경우, 음파의 전파속도를 340 m/s로 정의할 수 있다. 다만 이는 예시적인 것으로서, 배관 내를 흐르는 유체의 음파특성에 따라 전파속도는 다르게 정의될 수 있다.

[0034] 그 다음으로 충격 신호의 발생 위치 및 실험용 센서들의 위치를 알고 있는 상태에서, 상기 실험배관에 충격을 가하여 충격음 신호를 측정하는 실험용 충격신호 측정한다(S13). 만약 상기 실험배관으로 실제배관(10)을 사용한다면, 실험용 센서들은 각각 위치를 알고 있는 제1 및 제2센서(S1,S2)로 대체될 수 있다.

[0035] 그런 다음 상기 실험용 충격신호 측정단계(S13)에서 측정된 충격음 신호를, 구간으로 설정된 다수의 주파수 영역에서 시간-주파수 분석을 수행한다(S14). 여기서 주파수 영역의 구간 설정은 차단주파수 및 진동모드를 고려하여 적절한 구간으로 구분하며, 각 주파수의 구간 영역에서 시간-주파수 분석을 수행한다. 이 경우에도 전술한 연속 웨이블렛 변환(CWT)을 이용하는 것이 바람직하다.

[0036] 시간-주파수 분석이 완료되면, 상기 분석단계(S14)에서 분석된 결과를 이용하여, 구간으로 설정된 각 주파수 영역에서 유체의 음향 전파속도를 계산한다(S15).

[0037] 끝으로, 상기 음향 전파속도 계산단계(S15)에서 계산된 음향 전파속도와 상기 음향 전파속도 정의단계(S12)에서 정의된 음향 전파속도의 차이가 최소가 되는 것으로 주파수 영역, 즉 음향전파 특성의 왜곡이 최소화된 주파수 영역을 선정한다(S16).

[0038] 도 4a 내지 도 4e에는 연속 웨이블렛 변환을 이용하여 최적 주파수 영역을 추출하는 방법을 설명하기 위한 참고도들이 도시되어 있다. 다만, 여기에서는 구간 설정된 주파수 영역을 2000~3000Hz로 예시하여 설명하고 있으나, 최적의 주파수 영역을 추출하기 위해서는 다양하게 구간 설정된 주파수 영역에 대해 동일한 과정을 반복하여 최

적의 주파수 영역을 추출하여야 한다.

[0039] 먼저 도 4a에 도시된 바와 같이, 실제배관(10)의 충격음 신호가 측정되면, 분산파 특성에 의해 왜곡된 이상신호를 여과하여 제거한다.

[0040] 그런 다음, 각각 센서에서 측정된 여과된 충격음 신호를 연속 와이블렛 변환 하여 도 4b 및 도 4c에 도시된 바와 같이, 각 센서에서 시간과 주파수의 그래프를 얻는다.

[0041] 다음으로, 도 4d에 나타낸 바와 같이, 각 센서의 시간차이, 즉 지연시간(△t)을 구할 수 있다.

[0042] 끝으로, 각 센서의 지연시간(△t)과 각 센서의 위치를 알고 있으므로, 도 5e와 같이 음향 전파속도를 계산할 수 있다. 이 때 음파의 전파속도를 340 m/s로 정의 한다면, 실험적으로 구해지는 음향 전파속도가 이와 유사한 값을 나타나기 때문에, 상기 구간 설정된 주파수 영역(2000 ~ 3000 Hz)은 왜곡이 최소화된 최적의 주파수 영역으로 결정할 수 있다.

[0043] 이상에서 살펴본 바와 같이, 본 발명에 따른 충격위치 탐지방법에 의하면, 실제 배관 내부의 음향특성을 고려하여 충격신호의 왜곡이 최소화된 주파수영역을 활용하고, 연속 웨이블렛 변환을 이용하여 보다 높은 분해능을 가진 정보를 얻을 수 있기 때문에, 충격 위치를 탐지할 때 보다 적은 오차의 결과를 얻을 수 있다.

[0044] 본 발명은 도면에 도시된 실시예를 참고로 설명되었으나 이는 예시적인 것에 불과하며, 본 기술 분야의 통상의 지식을 가진 자라면 이로부터 다양한 변형 및 균등한 다른 실시예가 가능하다는 점을 이해할 것이다. 따라서, 본 발명의 진정한 기술적 보호 범위는 첨부된 특허청구범위의 기술적 사상에 의하여 정해져야 할 것이다.

## 도면의 간단한 설명

[0045] 도 1은 종래 상관관계기법에 의한 배관의 충격 위치 탐지방법을 설명하기 위한 참고도,

[0046] 도 2는 본 발명의 실시예에 따른 배관의 충격 위치 탐지방법을 나타낸 흐름도,

[0047] 도 3은 도 2에 나타낸 최적 주파수 영역 추출단계를 설명하기 위한 흐름도,

[0048] 도 4a 내지 도 4e는 웨이블렛 변환을 이용하여 최적 주파수 영역을 추출하는 방법을 설명하기 위한 참고도들이다.

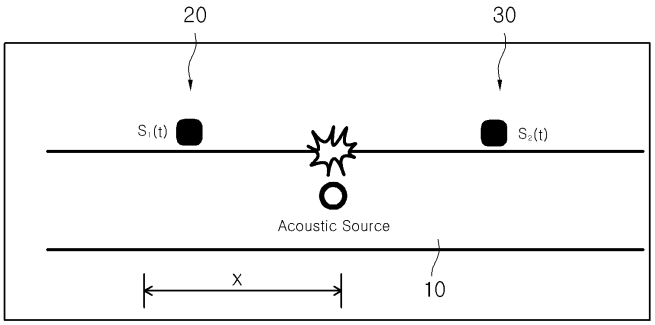
[0049] <도면의 주요 부분에 대한 간단한 설명>

[0050] 10 : 실제배관 20 : 제1센서

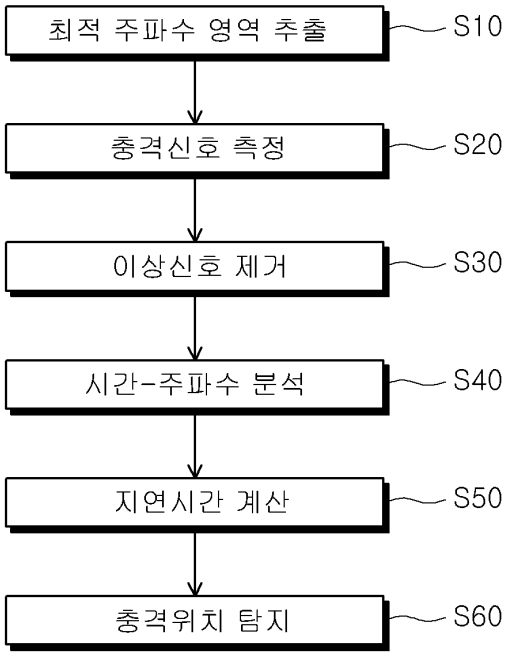
[0051] 30 : 제2센서

## 도면

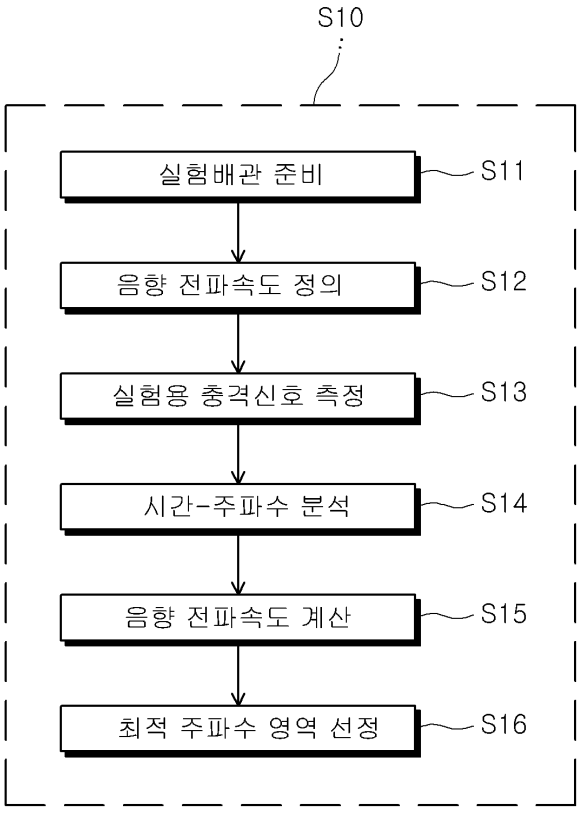
### 도면1



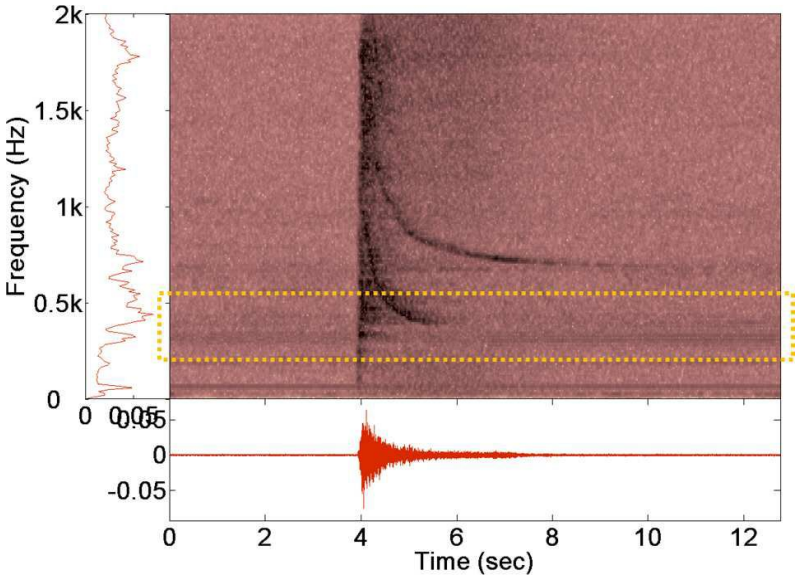
도면2


최적 주파수 영역 추출
S10
충격신호 측정
S20
이상신호 제거
S30
시간-주파수 분석
S40
지연시간 계산
S50
충격위치 탐지
S60

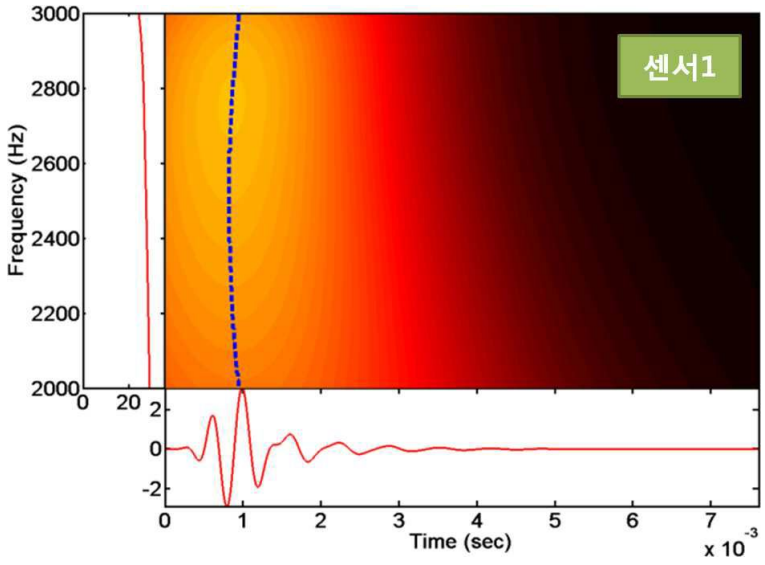
도면3


S10
실험배관 준비
S11
음향 전파속도 정의
S12
실험용 충격신호 측정
S13
시간-주파수 분석
S14
음향 전파속도 계산
S15
최적 주파수 영역 선정
S16

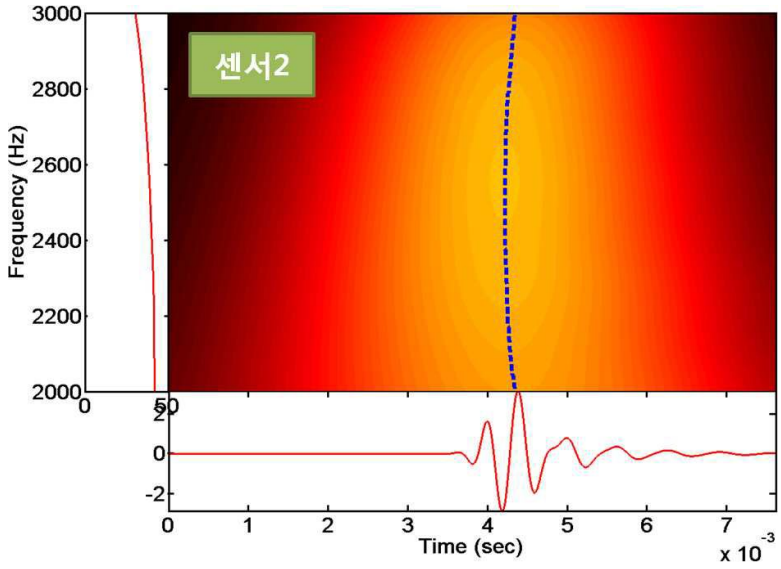
도면4a


2k
1.5k
1k
0.5k
0
Frequency (Hz)
0
0.05
0
-0.05
0
2
4
6
8
10
12
Time (sec)

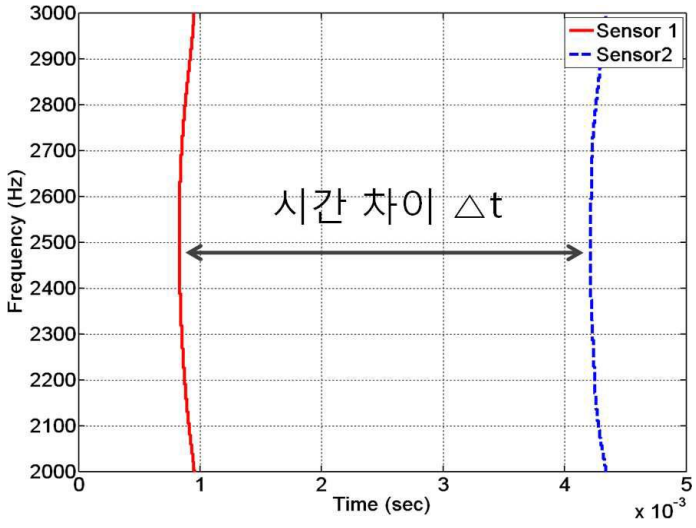
도면4b


센서1
3000
2800
2600
2400
2200
2000
Frequency (Hz)
0
20
2
0
-2
0
1
2
3
4
5
6
7
Time (sec)
x 10^-3

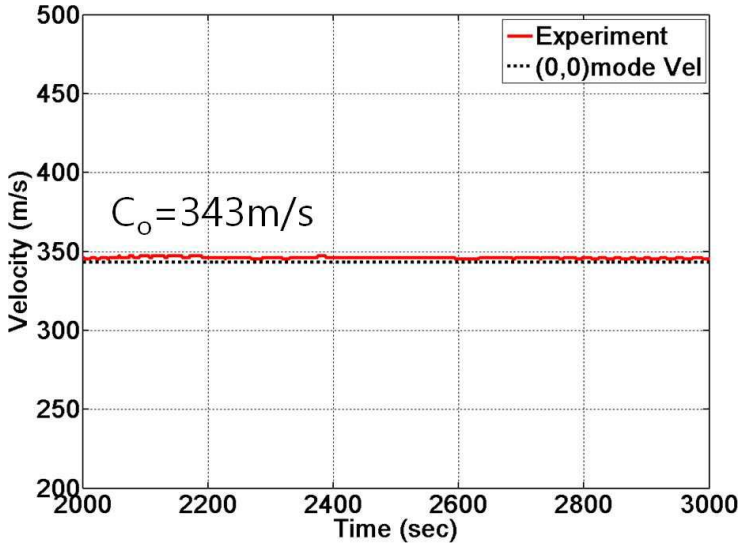
도면4c


센서2
Frequency (Hz)
3000
2800
2600
2400
2200
2000
0
50
2
0
-2
0
1
2
3
4
5
6
7
Time (sec)
x 10^-3

도면4d


Sensor 1
Sensor2
시간 차이 △t
Frequency (Hz)
3000
2900
2800
2700
2600
2500
2400
2300
2200
2100
2000
0
1
2
3
4
5
Time (sec)
x 10^-3

도면4e


Experiment
(0,0)mode Vel
$C_o$=343m/s
Velocity (m/s)
Time (sec)
500
450
400
350
300
250
200
2000
2200
2400
2600
2800
3000