



**(19) 대한민국특허청(KR)**  
**(12) 등록특허공보(B1)**

(45) 공고일자 2014년05월27일  
 (11) 등록번호 10-1398776  
 (24) 등록일자 2014년05월16일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
 G01N 29/36 (2006.01) G01N 29/44 (2006.01)  
 (21) 출원번호 10-2013-0064130  
 (22) 출원일자 2013년06월04일  
 심사청구일자 2013년06월04일  
 (56) 선행기술조사문헌  
 KR1020100072820 A  
 JP2004198442 A  
 JP2001299764 A  
 JP2006064574 A

(73) 특허권자  
 성균관대학교산학협력단  
 경기도 수원시 장안구 서부로 2066, 성균관대학교  
 내 (천천동)  
 (72) 발명자  
 강토  
 경기 수원시 장안구 조원로89번길 43-27, 나동  
 106호 (조원동, 거화빌라)  
 김훈희  
 경기 수원시 장안구 화산로141번길 9-10, 201호  
 (천천동)  
 (뒷면에 계속)  
 (74) 대리인  
 나승택, 조영현

전체 청구항 수 : 총 10 항

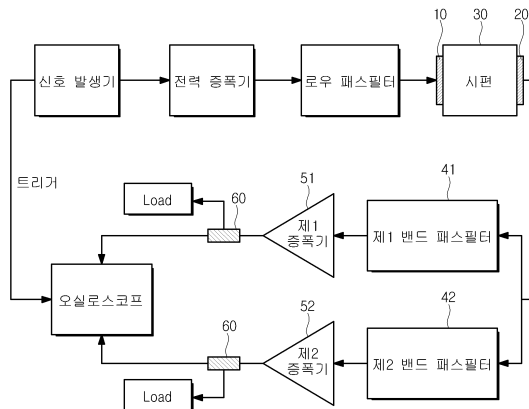
심사관 : 박재우

(54) 발명의 명칭 **노이즈에 강인한 비선형 파라미터 측정 방법 및 시스템**

**(57) 요약**

재료의 비선형 파라미터를 측정할 수 있는 비선형 파라미터 측정 방법 및 시스템이 개시된다. 본 발명에 따른 비선형 파라미터 측정 방법 및 시스템은 아날로그 밴드패스필터와 중간 주파수 증폭기를 구비하는 회로를 이용하여, 시편에 부착된 탐촉자를 통과하여 출력되는 기본파 및 제2 고조파 신호를 구분하여 처리하고 노이즈에 의한 영향을 최소화함으로써, 재료의 비선형 파라미터를 정확하게 측정할 수 있다.

**대표도** - 도3



(72) 발명자

**김학준**

경기 화성시 봉담읍 와우로15번길 10, 313동 1802호 (봉담그대가3단지)

**이택규**

경기 수원시 장안구 하물로30번길 45-18, 204호 (천천동)

**송성진**

경기 군포시 오금로 34, 376동 1401호 (금정동, 삼익소월아파트)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 20111020400020

부처명 지경부

연구사업명 에너지기술개발사업(2/2년차)

연구과제명 가스터빈용 니켈기 초내열 합금의 TME 수명예측을 위한 비파괴 초기열화 진단 기술 개발

기여율 1/1

주관기관 성균관대학교 산학협력단

연구기간 2012.07.01 ~ 2013.06.30

---

## 특허청구의 범위

### 청구항 1

시편의 일단에 접촉되는 제1 탐촉자에 신호를 입력하는 신호 입력 단계;

기본파를 필터링 하는 제1 밴드패스필터 및 제2 고조파를 필터링 하는 제2 밴드패스필터를 이용하여 상기 시편의 타단에 접촉되는 제2 탐촉자로부터 출력되는 신호를 필터링 하며, 상기 제1 밴드패스필터 및 제2 밴드패스필터는 아날로그 필터로 구성되는 필터링 단계;

상기 제1 밴드패스필터의 출력단에 연결되며 기본파를 증폭하는 제1 증폭기 및 상기 제2 밴드패스필터의 출력단에 연결되며 제2 고조파를 증폭하는 제2 증폭기를 이용하여 상기 필터링 단계를 거친 신호를 증폭시키는 증폭 단계;

상기 증폭 단계를 거친 신호의 전압을 측정하는 전압 측정 단계;

상기 제2 탐촉자에 대한 보정함수를 계산하는 보정함수 계산 단계;

상기 보정함수 계산 단계에서 계산한 제2 탐촉자에 대한 보정함수와 상기 전압 측정 단계에서 계산한 전압을 이용하여 기본파와 제2 고조파의 진폭을 계산하는 진폭 계산 단계; 및

상기 진폭 계산 단계에서 계산한 기본파와 제2 고조파의 진폭을 이용하여 상기 시편의 비선형 파라미터를 계산하는 비선형 파라미터 계산 단계;

를 포함하는 것을 특징으로 하는 비선형 파라미터 측정 방법.

### 청구항 2

제1항에 있어서,

상기 신호 입력 단계는 신호 발생기에서 발생한 신호를 전력 증폭기 및 로우패스필터에 순차적으로 통과시켜 상기 제1 탐촉자를 통하여 상기 시편에 입력하는 것을 특징으로 하는 비선형 파라미터 측정 방법.

### 청구항 3

제1항에 있어서,

상기 제1 및 제2 증폭기는 중간주파수 증폭기(Intermediate Frequency Amplifier)인 것을 특징으로 하는 비선형 파라미터 측정 방법.

### 청구항 4

제1항에 있어서,

상기 진폭 계산 단계는 아래의 식을 이용하여 기본파 성분의 절대변위진폭 및 제2 고조파 성분의 절대변위진폭을 계산하는 것을 특징으로 하는 비선형 파라미터 측정 방법.

$$A_{inc}(\omega_1) = \frac{|H(\omega)| * |V_{out}(\omega_1)|}{|Z(\omega_1)|}$$

$$A_{inc}(\omega_2) = \frac{|H(\omega)| * |V_{out}(\omega_2)|}{|Z(\omega_2)|}$$

여기서  $A_{inc}(\omega_1)$  및  $A_{inc}(\omega_2)$ 는 각각 기본파 및 제2 고조파 성분의 진폭,  $V_{out}(\omega_1)$  및  $V_{out}(\omega_2)$ 는 각각 기본파 및 제2 고조파의 전압,  $Z(\omega_1)$  및  $Z(\omega_2)$ 는 각각 기본파 및 제2 고조파의 전압을 측정하는 전압 프로브의 임피던스이며,  $H(\omega)$ 는 제2 탐촉자에 대한 보정함수이다.

**청구항 5**

제4항에 있어서,

상기 제2 탐촉자에 대한 보정함수는 아래의 식을 이용하여 계산하는 것을 특징으로 하는 비선형 파라미터 측정 방법.

$$H(\omega) = \sqrt{\frac{|D(z, \omega)|}{2\omega^2 \rho v \pi b^2 |I_{out}(\omega)|} \left| V_{in}(\omega) + \frac{I_{in}(\omega) V_{out}(\omega)}{I_{out}(\omega)} \right|}$$

여기서  $\rho$ 는 시편의 밀도,  $b$ 는 제2 탐촉자의 반지름,  $v$ 는 시편 내부에서의 종파의 속도,  $D(z, \omega)$ 는 회절교정(diffraction correction)함수,  $I_{in}(\omega)$  및  $I_{out}(\omega)$ 는 제2 탐촉자 입출력 신호의 전류,  $V_{in}(\omega)$  및  $V_{out}(\omega)$ 는 제2 탐촉자 입출력 신호의 전압이다.

**청구항 6**

제1항 내지 제5항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 비선형 파라미터 계산 단계는 아래의 식을 이용하여 상기 시편의 비선형 파라미터를 계산하는 것을 특징으로 하는 비선형 파라미터 측정 방법.

$$\beta = \frac{A_2}{A_1^2}$$

여기서  $A_1$  및  $A_2$ 는 각각 기본파 및 제2 고조파 성분의 절대변위진폭,  $\beta$ 는 시편의 비선형 파라미터이다.

**청구항 7**

시편의 일단에 접촉되는 제1 탐촉자에 입력하는 신호 입력부;

기본파를 필터링 하는 제1 밴드패스필터 및 제2 고조파를 필터링 하는 제2 밴드패스필터를 이용하여 상기 시편의 타단에 접촉되는 제2 탐촉자로부터 출력되는 신호를 필터링 하며, 상기 제1 밴드패스필터 및 제2 밴드패스필터는 아날로그 필터로 구성되는 필터링 부;

상기 제1 밴드패스필터의 출력단에 연결되며 기본파를 증폭하는 제1 증폭기 및 상기 제2 밴드패스필터의 출력단에 연결되며 제2 고조파를 증폭하는 제2 증폭기를 이용하여 상기 필터링 부를 통과한 신호를 증폭시키는 신호 증폭부;

상기 신호 증폭부를 통과한 신호의 전압을 측정하는 전압 측정부;

상기 제2 탐촉자에 대한 보정함수를 계산하는 보정함수 계산부;

상기 보정함수 계산부에서 계산한 제2 탐촉자에 대한 보정함수와 상기 전압 측정부에서 계산한 전압을 이용하여 기본파와 제2 고조파의 진폭을 계산하는 진폭 계산부; 및

상기 진폭 계산부에서 계산한 기본파와 제2 고조파의 진폭을 이용하여 상기 시편의 비선형 파라미터를 계산하는 비선형 파라미터 계산부;

를 포함하는 것을 특징으로 하는 비선형 파라미터 측정 시스템.

### 청구항 8

제7항에 있어서,

상기 신호 입력부는 신호 발생기에서 발생한 신호를 전력 증폭기 및 로우패스필터에 순차적으로 통과시켜 상기 제1 탐촉자를 통하여 상기 시편에 입력하는 것을 특징으로 하는 비선형 파라미터 측정 시스템.

### 청구항 9

제7항에 있어서,

상기 제1 및 제2 증폭기는 중간주파수 증폭기(Intermediate Frequency Amplifier)인 것을 특징으로 하는 비선형 파라미터 측정 시스템.

### 청구항 10

제7항에 있어서,

상기 보정함수 계산부는 아래의 식을 이용하여 제2 탐촉자에 대한 보정함수를 계산하는 것을 특징으로 하는 비선형 파라미터 측정 시스템.

$$H(\omega) = \sqrt{\frac{|D(z, \omega)|}{2\omega^2 \rho v \pi b^2 |I_{out}(\omega)|} \left| V_{in}(\omega) + \frac{I_{in}(\omega) V_{out}(\omega)}{I_{out}(\omega)} \right|}$$

여기서  $\rho$ 는 시편의 밀도,  $b$ 는 제2 탐촉자의 반지름,  $v$ 는 시편 내부에서의 종파의 속도,  $D(z, \omega)$ 는 회절교정(diffraction correction)함수,  $I_{in}(\omega)$  및  $I_{out}(\omega)$ 는 제2 탐촉자 입출력 신호의 전류,  $V_{in}(\omega)$  및  $V_{out}(\omega)$ 는 제2 탐촉자 입출력 신호의 전압이다.

## 명세서

### 기술분야

[0001] 본 발명은 노이즈에 강인한 압전형 수신기법을 이용한 비선형 파라미터 측정 방법 및 시스템에 관한 것으로서, 보다 구체적으로는 제2 고조파에 포함된 노이즈의 영향을 최소화하기 위하여 아날로그 밴드패스필터 및 중간 주파수 증폭기를 이용하여 노이즈를 제거한 제2 고조파 신호를 측정하는 압전형 수신기법을 이용한 비선형 파라미터 측정 방법 및 시스템에 관한 것이다.

### 배경기술

[0002] 비파괴검사는 어떠한 제품을 생산, 제조하거나 또는 사용함에 있어 결함의 유무를 확인하여 그 제품의 품질에 대한 안전성을 얻고자 실시한다. 예를 들어 부식상태, 노후화, 균열발생의 유무 등을 확인하여 계속 사용에 대한 평가를 위해 실시하기도 한다.

- [0003] 비파괴검사 방법 중 하나인 비선형 초음파 기법은 음파의 변위를 측정하여 재료의 비선형 파라미터를 계산하고, 계산된 비선형 파라미터를 이용하여 재료의 열화도를 평가할 수 있다.
- [0004] 금속 재료의 비선형 파라미터는 고유한 물성치로서 기본주파수의 음압의 크기와 제2 고조파의 음압의 크기를 측정하면 산정할 수 있으며, 비선형 초음파 기법은 음파의 변위를 측정하기 위하여 압전형 수신 기법을 사용할 수 있는데, 압전형 수신 기법은 시편에 압전물질인 탐촉자를 부착하여 시편에 입력되는 신호와 시편으로부터 출력되는 신호를 이용한다.
- [0005] 종래의 압전형 수신 기법은 시편으로부터 출력되는 신호로부터 기본주파수와 제2 고조파 신호를 동시에 측정하여 비선형 파라미터 계산에 이용하는데, 제2 고조파 신호는 기본주파수에 비하여 신호의 크기가 현저히 작고 노이즈 신호와 섞이는 경우에는 노이즈로부터 분리하여 측정하기 어려운 문제점이 있었다.
- [0006] 제2 고조파 신호를 측정하기 충분한 정도로 증폭시키기 않거나 노이즈로부터 분리하지 못하는 경우에는 계산된 비선형 파라미터 값이 재료의 실제 비선형 파라미터 값과 다르게 나오거나 측정할 때마다 측정값의 편차가 커지는 문제가 생긴다.
- [0007] 따라서, 측정 오차를 줄이고 정확한 비선형 파라미터를 계산할 수 있는 방법이 필요하게 되었다.

**선행기술문헌**

**특허문헌**

- [0008] (특허문헌 0001) 등록특허공보 제10-0573967호 '비파괴검사형 초음파탐사시스템'

**발명의 내용**

**해결하려는 과제**

- [0009] 상술한 바와 같은 종래 기술의 문제점을 해결하기 위한 본 발명의 목적은, 제2 고조파 신호에 포함된 노이즈를 제거하고 측정 오차를 제거하여 정확한 비선형 파라미터를 측정하는 것이다.

**과제의 해결 수단**

- [0010] 상술한 종래 기술의 문제점을 해결하기 위한 본 발명에 따른 비선형 파라미터 측정 방법은, 신호 입력 단계; 아날로그 밴드패스필터인 제1 및 제2 밴드패스필터를 이용하는 필터링 단계; 상기 필터링 단계를 거친 신호를 증폭시키는 증폭 단계; 상기 증폭 단계를 거친 신호의 전압을 측정하는 전압 측정 단계; 탐촉자의 보정함수를 계산하는 보정함수 계산 단계; 진폭 계산 단계; 및 비선형 파라미터 계산 단계를 포함한다.
- [0011] 또한, 상기 신호 입력 단계는 신호 발생기에서 발생한 신호를 전력 증폭기 및 로우패스필터에 순차적으로 통과시켜 시편에 신호를 입력하며, 상기 증폭 단계는 중간 주파수 증폭기인 제1 및 제2 증폭기로 구성된다.
- [0012] 또한, 본 발명에 따른 비선형 파라미터 측정 시스템은, 신호 입력부; 아날로그 밴드패스필터인 제1 및 제2 밴드패스필터로 구성되는 필터링 부; 상기 필터링 부를 통과한 신호를 증폭시키는 신호 증폭부; 상기 신호 증폭부를 통과한 신호의 전압을 측정하는 전압 측정부; 탐촉자의 보정함수를 계산하는 보정함수 계산부; 진폭 계산부; 및 비선형 파라미터 계산부를 포함한다.
- [0013] 또한, 상기 신호 입력부는 신호 발생기에서 발생한 신호를 전력 증폭기 및 로우패스필터에 순차적으로 통과시켜 시편에 신호를 입력하며, 상기 신호 증폭부는 중간 주파수 증폭기인 제1 및 제2 증폭기로 구성된다.

**발명의 효과**

- [0014] 상술한 바와 같이, 본 발명에 따른 비선형 파라미터 측정 방법 및 시스템은, 제2 고조파 신호에 포함된 노이즈

를 제거하고 측정 오차를 제거하여 정확한 비선형 파라미터를 측정할 수 있다.

**도면의 간단한 설명**

- [0015] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 비선형 파라미터 측정 방법의 흐름도이다.
- 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 비선형 파라미터 측정 시스템의 구성도이다.
- 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 비선형 파라미터 측정 시스템의 회로도이다.
- 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 제2 탐촉자의 보정함수를 측정하기 위한 회로도이다.
- 도 5는 디지털 밴드패스필터를 통과한 신호를 중간 주파수 증폭기에 의한 증폭단계 없이 측정한 기본파 및 제2 고조파의 절대변위진폭 그래프이다.
- 도 6은 도 5의 측정값을 이용하여 계산한 비선형 파라미터 그래프이다.
- 도 7은 본 발명의 일 실시예에 따른 비선형 파라미터 측정 방법 및 시스템으로 측정한 기본파 및 제2 고조파의 절대변위진폭 그래프이다.
- 도 8은 본 발명의 일 실시예에 따른 비선형 파라미터 측정 방법 및 시스템을 이용하여 계산된 비선형 파라미터 그래프이다.

**발명을 실시하기 위한 구체적인 내용**

- [0016] 이하, 첨부된 도면들을 참조하여 본 발명의 실시 형태에 관한 비선형 파라미터 측정 방법 및 시스템에 대해 상세히 설명하도록 한다.
- [0017] 후술할 설명에서는 본 발명의 실시예에 따른 동작을 이해하는데 필요한 부분만이 설명되며 그 이외 부분의 설명은 본 발명의 요지를 흐트리지 않도록 생략될 수 있다.
- [0018] 또한, 이하에서 설명되는 본 명세서 및 청구범위에 사용된 용어나 단어는 통상적이거나 사전적인 의미로 한정해서 해석되어서는 아니 되며, 본 발명을 가장 적절하게 표현할 수 있도록 본 발명의 기술적 사상에 부합하는 의미와 개념으로 해석되어야 한다.
- [0019] 금속 재료의 비선형 파라미터는 재료의 고유한 물성치로서 기본파의 음압의 크기와 제2 고조파의 음압의 크기를 측정하여 계산할 수 있으며, 비선형 파라미터를 계산하기 위해서는 검사대상 시편을 통과한 신호의 기본파 및 제2 고조파 성분의 진폭이 계산되어야 한다.
- [0020] 위와 같은 계산을 위한 변수를 구하기 위해서 검사대상 시편에 신호를 입력하고, 출력되는 신호로부터 전류 및 전압을 측정하게 되는데, 이하의 설명은 기본파 및 제2 고조파 성분의 진폭을 계산하기 위한 과정으로 이해될 수 있다.
- [0021] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 비선형 파라미터 측정 방법의 흐름도이다.
- [0022] 도 1을 참조하면 상기 비선형 파라미터 측정 방법은 신호 입력 단계(S100), 필터링 단계(S110), 증폭 단계(S120), 전압 측정 단계(S130), 진폭 계산 단계(S140), 비선형 파라미터 계산 단계(S150) 및 보정함수 계산단계(S160)로 구성된다.
- [0023] 한편, 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 비선형 파라미터 측정 시스템(100)의 구성도이며, 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 비선형 파라미터 측정 시스템의 회로도이다.
- [0024] 이하에서는 도 1 내지 도 3에 개시된 도면을 참조하여 본 발명에 따른 비선형 파라미터 측정 방법 및 시스템을 상세하게 설명하도록 한다.
- [0025] 압전형 수신 기법은 기본파 및 제2 고조파의 음압의 크기를 측정하기 위하여 압전물질인 탐촉자(10, 20)를 검사대상 시편(30)에 부착하여 이용하는데, 신호 입력 단계(S100)에서는 상기 시편의 일단에 부착된 제1 탐촉자(10)에 신호를 입력한다.
- [0026] 도 3을 참조하면, 상기 제1 탐촉자(10)를 통과한 신호는 시편(30)으로 입력되고, 시편으로 입력된 신호는 시편의 타단에 부착된 제2 탐촉자(20)를 통하여 출력된다. 이때, 상기 제1 탐촉자(10)로 입력되는 신호는 일정한 주

파수 값을 갖는데, 입력되는 신호의 주파수를  $f$ 라 하면, 상기 제1 탐촉자(10) 역시  $f$ 의 주파수를 갖는 압전물질로 구성되어 왜곡이 발생하지 않도록 한다.

- [0027] 한편, 상기 신호 입력 단계(S100)에서는 신호 발생기에서 발생한 신호를 전력 증폭기 및 로우패스필터에 순차적으로 통과시킨 후 기본 주파수  $f$ 를 갖는 신호를 상기 제1 탐촉자(10)에 입력한다.
- [0028] 주파수  $f$ 의 입력신호가 상기 시편(30)을 통과하여 상기 제2 탐촉자(20)에 도달하면, 시편 내부의 열화 등의 손상에 의하여 기본파 외에도 고조파 성분이 섞여있게 되며, 상기 제2 탐촉자(20)를 지나 출력되는 신호는 주파수  $f$  및  $2f$  성분을 포함하게 된다.
- [0029] 또한, 상기 필터링 단계(S110)에서는 상기 제2 탐촉자(20)로부터 출력되는 신호를 필터링하는데, 기본적으로는 밴드패스필터를 이용하여 기본파 성분과 제2 고조파 성분을 필터링한다.
- [0030] 본 발명의 일 실시예에 따른 비선형 파라미터 측정 방법에서 상기 필터링 단계(S110)는 기본 주파수( $f$ )를 필터링하는 제1 밴드패스필터 및 제2 고조파( $2f$ )를 필터링 하는 제2 밴드패스필터를 이용한다.
- [0031] 한편, 상기 제1 및 제2 밴드패스필터는 디지털 필터를 이용할 수도 있으나, 본 발명의 일 실시예에 따른 비선형 파라미터 측정 방법 및 시스템에서는 아날로그 필터를 이용한다.
- [0032] 후술하는 바와 같이, 비선형 파라미터를 측정하는데 있어서 제2 고조파와 노이즈의 구분이 중요하므로, 노이즈 및 전 고조파 왜곡(Total Harmonic Distortion, THD) 특성이 좋은 아날로그 필터를 이용하는 것이 바람직하다.
- [0033] 또한, 디지털 필터를 이용하는 경우에는 A/D Converter 및 D/A Converter 를 구비하여야 하고, 디지털 신호 처리(Digital Signal Process, DSP) 장치가 더 필요하게 되어 회로 구성이 복잡해지고 여러 단계의 신호 변환 과정에서 예상치 못한 노이즈가 끼어드는 문제가 발생할 수 있다.
- [0034] 따라서, 노이즈 신호 크기 정도의 작은 신호 크기를 갖는 제2 고조파를 이용하는 비선형 파라미터 측정에서는 디지털 필터를 이용하는 것보다는 아날로그 필터를 이용하는 것이 정확한 측정 및 계산에 도움이 된다.
- [0035] 상기 증폭 단계(S120)는 상기 필터링 단계(S110)를 거친 신호를 증폭시켜 이후의 전압 측정 단계(S130)에서의 측정을 용이하게 한다.
- [0036] 일반적으로 제2 고조파는 신호의 크기가 작고 노이즈와의 구분이 쉽지 않기 때문에 제2 고조파를 따로 필터링하고 증폭시켜 신호를 측정하는 것이 정확한 비선형 파라미터 계산에 유리하다.
- [0037] 종래의 비선형 파라미터 측정 방법은 검사대상 재료에 부착된 압전물질로부터 출력된 신호에서 기본파와 고조파 성분의 전류를 동시에 측정하는데, 기본파에 비해 크기가 현저히 작은 고조파 신호를 검출해내기 어렵고 노이즈와 구분하기 어려워 정확한 비선형 파라미터 계산에 이용이 어려운 문제점이 있다.
- [0038] 본 발명은 위와 같이, 제1 및 제2 밴드패스필터를 이용하여 기본파와 제2 고조파 성분을 필터링하고, 필터링한 신호를 증폭하여 제2 고조파 신호를 정확하게 검출할 수 있게 한다.
- [0039] 한편, 상기 증폭 단계(S120)에서는 중간 주파수 증폭기(Intermediate Frequency Amplifier, IF Amp)를 사용하는데, 상기 중간 주파수 증폭기는 상기 제1 및 제2 밴드패스필터를 통과한 신호를 각각 주파수  $f$  및  $2f$ 를 중심으로 하여 신호를 증폭하는 역할을 수행한다.
- [0040] 중간 주파수 증폭기는 신호의 선택성 및 민감도를 향상시키고 다음 단계에서 신호의 측정에 적당한 크기의 신호를 제공하는데에 효과적이다.
- [0041] 또한, 상기 전압 측정 단계(S130)에서는 상기 제1 및 제2 증폭기(51, 52)의 출력단에 연결되는 전압 프로브(60)를 이용하여 증폭된 신호의 전압을 측정하고, 다음 단계에서의 진폭 계산에 이용한다.
- [0042] 상기 진폭 계산 단계(S140)에서는 아래의 식을 이용하여 기본파 성분의 진폭 및 제2 고조파 성분의 진폭을 계산한다.



수학식 1

$$A_{inc}(\omega_1) = \frac{|H(\omega)| * |V_{out}(\omega_1)|}{|Z(\omega_1)|}$$

$$A_{inc}(\omega_2) = \frac{|H(\omega)| * |V_{out}(\omega_2)|}{|Z(\omega_2)|}$$

여기서  $A_{inc}(\omega_1)$  및  $A_{inc}(\omega_2)$ 는 각각 기본파 및 제2 고조파 성분의 진폭,  $V_{out}(\omega_1)$  및  $V_{out}(\omega_2)$ 는 각각 기본파 및 제2 고조파의 전압,  $Z(\omega_1)$  및  $Z(\omega_2)$ 는 각각 기본파 및 제2 고조파의 전압을 측정하는 전압 프로브의 임피던스이며,  $H(\omega)$ 는 제2 탐촉자에 대한 보정함수이다.

이론적인 비선형 파라미터는 재료에 의해 발생하는 고조파 성분만이 고려되어야 하지만, 실제에서는 재료에 의한 고조파 성분뿐만 아니라, 탐촉자를 포함하는 전기적인 시스템 등에 의해 발생된 고조파 성분들 까지도 비선형 파라미터측정에 포함된다.

따라서, 실제로 측정되는 비선형성은 순수 재료의 비선형성보다 과다하게 평가될 수 있으며, 일반적으로 재료의 비선형성에 의해 발생되는 고조파의 크기가 매우 작기 때문에 측정 결과에 큰 영향을 미칠 수 있다.

상기 제2 탐촉자에 대한 보정함수  $H(\omega)$ 는 위와 같은 탐촉자를 포함하는 전기적인 시스템에 의한 영향을 비선형 파라미터 측정 과정에 반영하여 계산의 오차를 최소화하기 위함이다.

한편, 상기 비선형 파라미터 계산 단계(S150)에서는 상기 진폭 계산 단계(S140)에서 계산되어진 기본파 및 제2 고조파 성분의 진폭을 이용하여 시편(30)의 비선형 파라미터를 계산하며, 구체적으로는 아래의 식을 이용한다.

수학식 2

$$\beta = \frac{A_2}{A_1^2}$$

여기서  $A_1$  및  $A_2$ 는 각각 기본파 및 제2 고조파 성분의 절대변위진폭,  $\beta$ 는 시편의 비선형 파라미터이다.

상기 각 신호의 절대변위진폭( $A_1$ ,  $A_2$ )은 상기 수학식 1에서 계산된  $A_{inc}(\omega_1)$  및  $A_{inc}(\omega_2)$ 의 역푸리에 변환 값이다. 한편, 상기 수학식 2를 이용하여 재료의 비선형 파라미터를 계산할 수 있는 경우는, 파수(wave number) 및 신호의 전파거리를 상수로 고정할 수 있는 경우로 한정된다.

상기 보정함수 계산단계(S160)에서는 상기 진폭 계산 단계(S140)에서의 진폭 계산에 필요한 보정함수  $H(\omega)$ 를 계산하는데, 상기 보정함수  $H(\omega)$ 를 계산하는 방법은 아래 도 4에 대한 설명을 참조하도록 한다.

한편, 도 2를 참조하면, 본 발명에 따른 비선형 파라미터 측정 시스템(100)은 신호 입력부(110), 필터링부(120), 신호 증폭부(130), 전압 측정부(140), 진폭 계산부(150), 비선형 파라미터 계산부(160) 및 보정함수 계산부(170)를 포함하여 구성되며, 상기 비선형 파라미터 측정 방법의 상기 신호 입력 단계(S100), 필터링 단계(S110), 증폭 단계(S120), 전압 측정 단계(S130), 진폭 계산 단계(S140), 비선형 파라미터 계산 단계(S150) 및 보정함수 계산단계(S160)에 각각 대응하는 기능을 수행한다.

따라서, 상기 신호 입력부(110)는 신호 발생기에서 발생한 신호를 제1 및 제2 탐촉자(10, 20)가 부착된 시편(30)에 기본 주파수  $f$ 를 갖는 신호를 입력하고, 상기 필터링부(120)는 상기 제2 탐촉자(20)로부터 출력되는 신호를 필터링한다. 또한, 상기 신호 증폭부(130)는 상기 필터링부(120)에서 필터링 한 기본파 및 제2 고조파를

증폭하고, 상기 전압 측정부(140)는 상기 기본파 및 제2 고조파의 전압을 측정한다.

[0056] 또한, 상기 보정함수 계산부(170)는 상기 제2 탐촉자에 대한 보정함수 H(w)를 계산한다. 한편, 상기 진폭 계산부(150)는 상기 전압 측정부(140)에서 측정한 전압과 상기 보정함수 계산부(170)에서 계산한 보정함수 H(w)를 이용하여 기본파 및 제2 고조파의 진폭을 계산한다.

[0057] 마지막으로 상기 비선형 파라미터 계산부(160)는 상기 진폭 계산부(150)에서 계산한 진폭에 대하여 역푸리에 변환을 거친 기본파 및 제2 고조파의 절대변위진폭을 이용하여 시편의 비선형 파라미터를 계산한다.

[0058] 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 제2 탐촉자의 보정함수를 측정하기 위한 회로도이다.

[0059] 도 4를 참조하면, 상기 제2 탐촉자의 보정함수를 측정하기 위한 회로도는 광대역 펄서/리시버, 오실로스코프, 전압 및 전류 프로브(60, 70)로 구성되며, 시편(30)에 제2 탐촉자(20)만 접촉시킨 상태에서 입/출력 전압 및 전류를 측정한다.

[0060] 상기 광대역 펄서/리시버에서 발생시킨 신호는 상기 제2 탐촉자(20)를 통과하여 상기 시편(30)으로 입력되며, 시편의 반대편에서 반향되어 다시 상기 제2 탐촉자(20)를 통하여 출력되는 신호의 전압과 전류를 측정한다.

[0061] 한편, 제2 탐촉자의 보정함수 H(w)는 아래의 식을 이용하여 계산한다.

**수학식 3**

$$H(\omega) = \sqrt{\frac{|D(z, \omega)|}{2\omega^2 \rho v \pi b^2 |I_{out}(\omega)|} \left| V_{in}(\omega) + \frac{I_{in}(\omega) V_{out}(\omega)}{I_{out}(\omega)} \right|}$$

[0063] 여기서 ρ는 시편의 밀도, b는 제2 탐촉자의 반지름, v는 시편 내부에서의 종파의 속도, D(z,w)는 회절교정(diffraction correction)함수, I<sub>in</sub>(w) 및 I<sub>out</sub>(w)는 제2 탐촉자 입출력 신호의 전류, V<sub>in</sub>(w) 및 V<sub>out</sub>(w)는 제2 탐촉자 입출력 신호의 전압이다.

[0064] 상기 회절교정함수 D(z,w)는 상기 시편(30) 내부에서 신호의 번짐 또는 회절로 인한 효과를 보정하기 위한 함수로서, 변수 z는 시편 내부에서 신호의 전달거리를 의미하며, 주파수에 따른 입력 대비 출력의 효율을 나타낸다.

[0065] 압전 소자를 이용하여 시편의 비선형 파라미터를 측정할 때에는 탐촉자와 시편의 접촉 상태에 따라 측정 결과에 많은 영향을 미치게 되며, 따라서 비선형 파라미터를 측정할때마다 상기 보정함수 및 상기 회절교정함수를 측정하여야 한다.

[0066] 한편, 상기 회절교정함수는 아래의 수학식 4를 통하여 구할 수 있다.

**수학식 4**

$$D(z, \omega) = \left\{ 1 - e^{-j \frac{\omega a^2}{4Lc}} \left[ J_0 \left( \frac{\omega a^2}{2zc} \right) + j J_1 \left( \frac{\omega a^2}{2zc} \right) \right] \right\}^{-1}$$

[0068] 여기서 z는 신호의 전과거리, a는 탐촉자의 반지름, J<sub>0</sub> 및 J<sub>1</sub>은 0차 및 1차 베셀함수(Bessel Function), c는 초음파 속도, w는 각주파수이다.

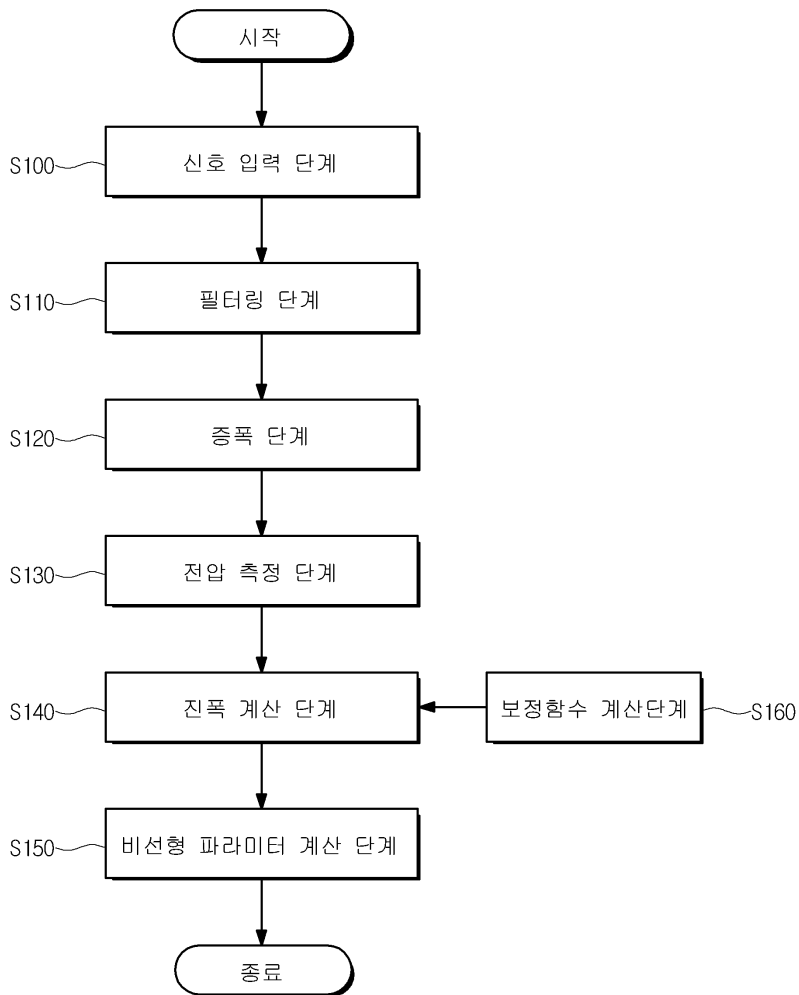
[0069] 한편, 상기 수학식 1 내지 수학식 3을 정리하면 다음과 같다.

[0070] 상술한 바와 같이, 본 발명에 따른 비선형 파라미터 측정 방법 및 시스템에서 최종적으로 계산하고자 하는 비선형 파라미터는 상기 수학식 3을 이용하여 계산하며, 수학식 3의 변수 A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>는 상기 수학식 1을 통해 계산된 진폭으로부터 역푸리에 변환을 통하여 계산한다. 그리고 상기 진폭을 계산하기 위해서 수학식 2의 보정함수 H(w)가 필요하며, 상기 보정함수 H(w)를 계산하기 위한 변수인 회절교정함수 D(z,w)를 계산하여야 한다.

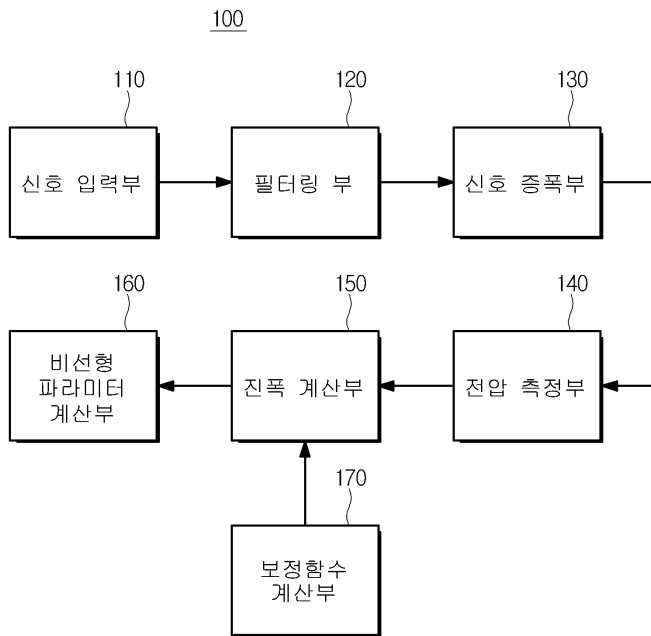


도면

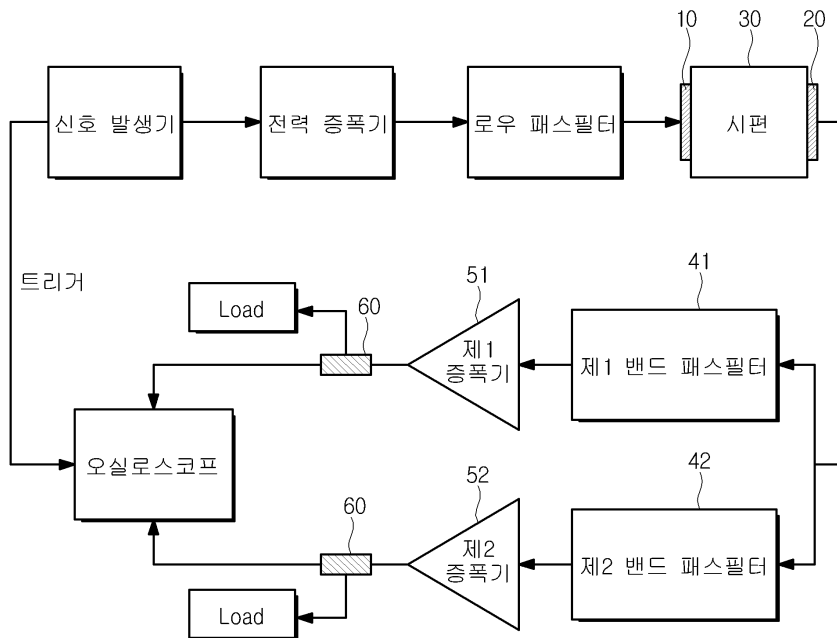
도면1



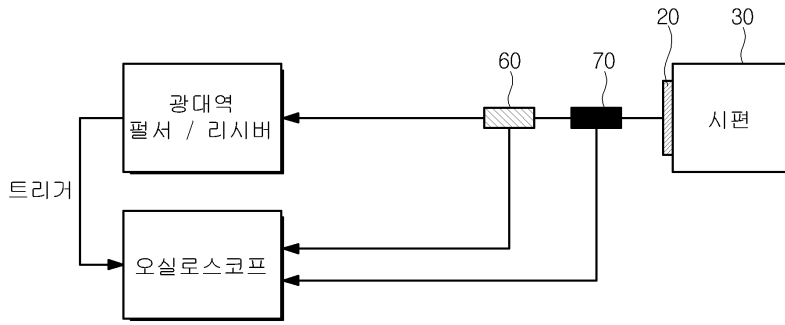
도면2



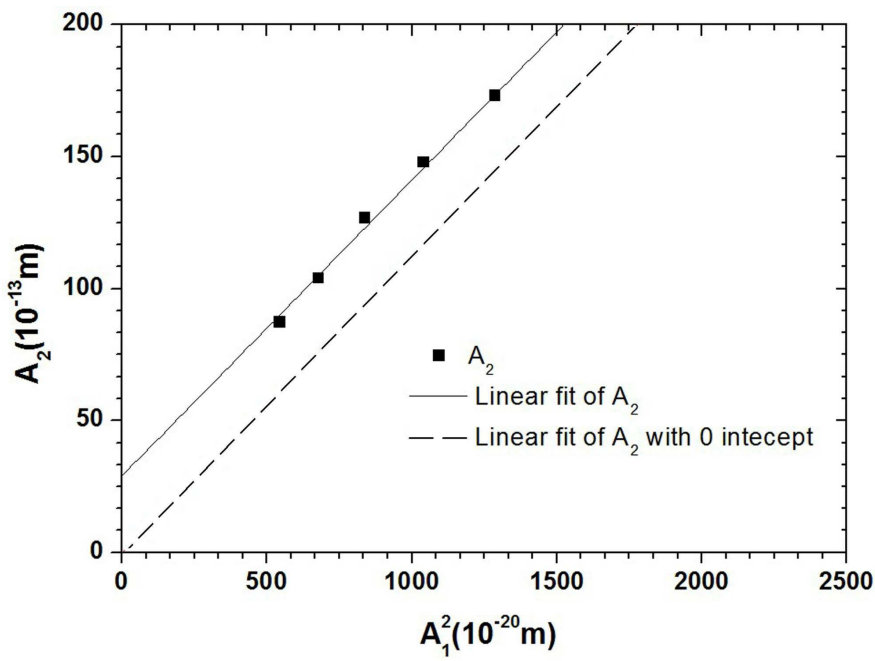
도면3



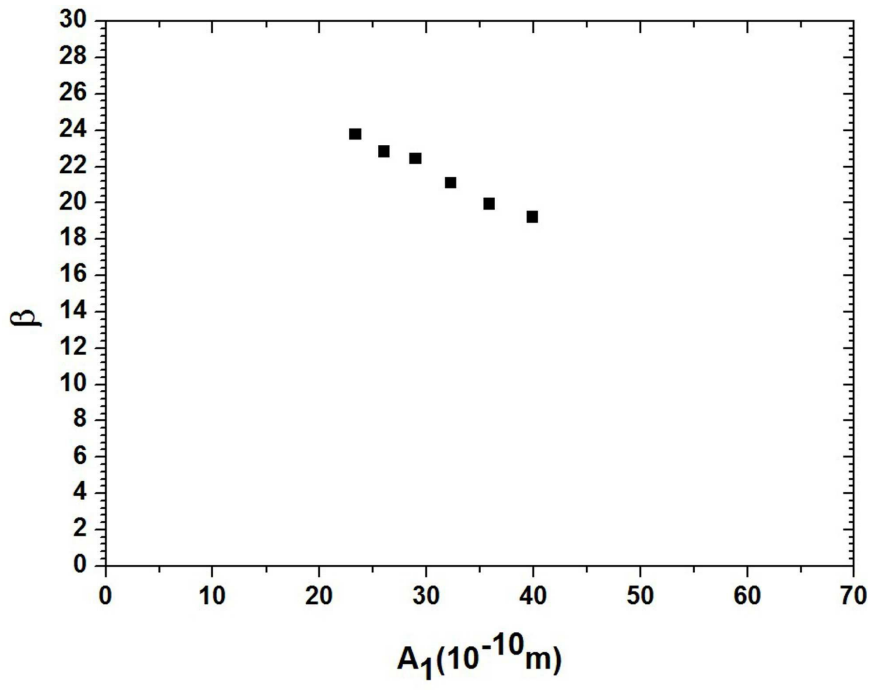
도면4



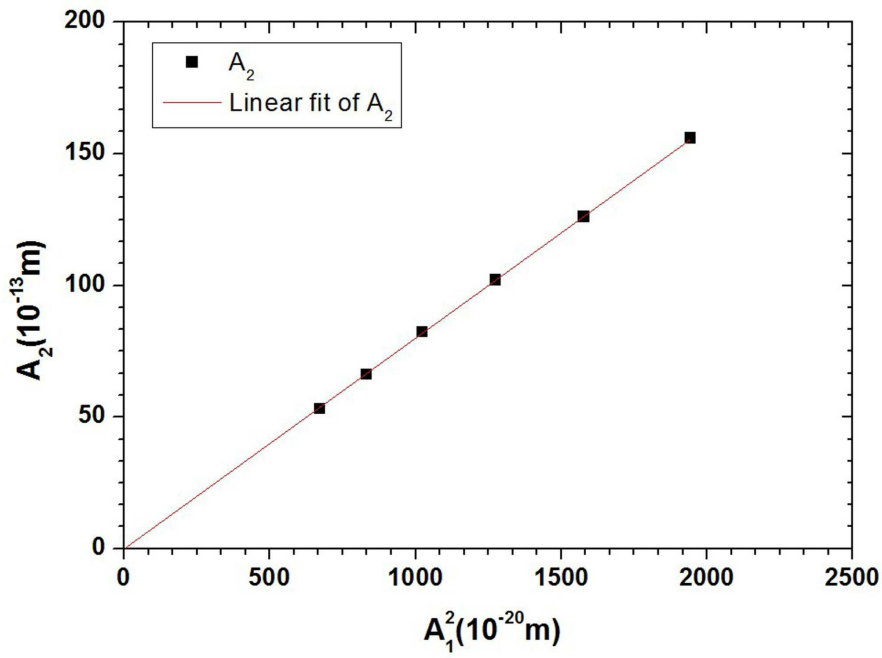
도면5



도면6



도면7



도면8

