



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2017년01월06일  
(11) 등록번호 10-1693310  
(24) 등록일자 2016년12월30일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
G01V 1/28 (2006.01) G01N 29/07 (2006.01)  
G01N 29/44 (2006.01) G01N 33/24 (2006.01)  
G06F 17/10 (2006.01)  
(52) CPC특허분류  
G01V 1/28 (2013.01)  
G01N 29/07 (2013.01)  
(21) 출원번호 10-2015-0162964  
(22) 출원일자 2015년11월20일  
심사청구일자 2015년11월20일  
(56) 선행기술조사문헌  
Yonghwan Joo, et al. Acoustic full-waveform inversion of surface seismic data using the Gauss-Newton method with active constraint balancing. Geophysical Prospecting, 61, 2013. pp. 166-182  
KR1020120019055 A  
US20130018640 A1  
KR1020100094419 A

(73) 특허권자  
한국지질자원연구원  
대전광역시 유성구 과학로 124 (가정동)  
(72) 발명자  
주용환  
대전광역시 유성구 지족로 240 501동 104호 (지족동, 노은해랑숲마을5단지아파트)  
변중무  
서울특별시 광진구 아차산로 549 1012동 1303호 (광장동, 현대파크빌아파트)  
설순지  
경기도 과천시 별양로 12 335-1602(래미안 슈르 Apt.)  
(74) 대리인  
특허법인 대아

전체 청구항 수 : 총 5 항

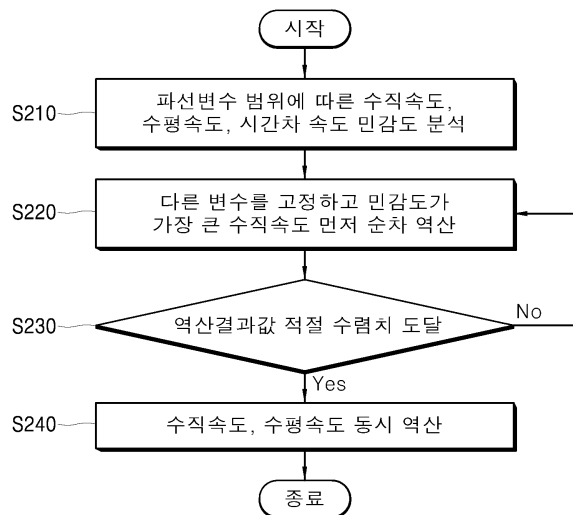
심사관 : 권민정

(54) 발명의 명칭 평면파를 이용한 이방성 매질에서의 전파형 역산방법

(57) 요약

평면파를 이용한 이방성 매질에서의 전파형 역산방법이 개시된다. 개시된 전파형 역산방법은 파선변수(ray-parameter)의 범위에 따른 P파 수직속도와 이방성변수의 민감도를 분석하는 단계; 다른 변수를 고정하고 민감도가 가장 큰 P파의 수직속도를 먼저 순차 역산하는 단계; 도출된 P파의 수직속도와 수평속도를 동시 역산하는 단계를 포함한다.

대표도 - 도6



(52) CPC특허분류

*G01N 29/4472* (2013.01)

*G01N 33/24* (2013.01)

*G06F 17/10* (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 GP2015-045

부처명 미래창조과학부

연구관리전문기관 국가과학기술연구회

연구사업명 한국지질자원연구원 주요사업

연구과제명 고성능 석유해저 탄성파탐사 자료처리 및 다성분 탐사기술 개발

기 여 율 1/1

주관기관 한국지질자원연구원

연구기간 2015.01.01 ~ 2017.12.31

공지예외적용 : 있음

---

**명세서**

**청구범위**

**청구항 1**

유한차분법을 이용한 순수음향파동방정식과 평면파 가정을 이용한 전파형 역산방법에 있어서,

- (a) 파선변수(ray-parameter)의 범위에 따른 P파 수직속도와 이방성변수의 민감도를 분석하는 단계;
  - (b) 다른 변수를 고정하고 민감도가 가장 큰 P파의 수직속도를 먼저 순차 역산하되, 역산결과가 적절수렴치 도달 시까지 상기 파선변수의 범위 전체를 이용하여 반복 역산하는 단계;
  - (c) 상기 (b) 단계에서 도출된 P파의 수직속도의 상기 적절수렴치와 수평속도를 동시 역산하는 단계;
- 를 포함하는,  
전파형 역산기법.

**청구항 2**

제 1 항에 있어서,

상기 순수음향파동방정식은

한 점의 주위를 둘러싼 네 셀의 물성정보를 이용한 셀기반 유한차분법을 이용하여 표현된 것을 특징으로 하는,  
전파형 역산기법.

**청구항 3**

제 1 항에 있어서,

상기 순수음향파동방정식은 하기 식 1로 표현되는 것을 특징으로 하는,

전파형 역산기법.

[식 1]

$$k \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial z^2} \approx \frac{1}{(\Delta x \Delta z)^2} \cdot \frac{(k_1 + k_2 + k_3 + k_4)}{4} \left[ u_{i+1,j+1} - 2u_{i,j+1} + u_{i-1,j+1} - 2u_{i+1,j} + 4u_{i,j} - 2u_{i-1,j} + u_{i+1,j-1} - 2u_{i,j-1} + u_{i-1,j-1} \right]$$

(  $\omega$  : 각주파수;  $v_{pz}$  : P파의 수직속도;  $v_{px} = v_{pz} \sqrt{1+2\varepsilon}$  : P파의 수평속도;  $v_{pm} = v_{pz} \sqrt{1+2\delta}$  : P파의 시간차(moveout) 속도;  $v_{sz}$  : sv파의 수직속도;  $k$  : 절점 (i, j)번째에 인접한 셀의 물성정보인  $v_{pz}$ ,  $\varepsilon$ ,  $\delta$  과 같은 음향파동속도와 이방성 파라미터; U : 파동장 )

**청구항 4**

제 1 항에 있어서,

상기 파선변수는

하기 식 2 또는 식 3의 행렬항이 하기 식 4의 우변에 의해 대체되어 정의되는 것을 특징으로 하는, 전파형 역산기법.

[식 2]

$$\begin{bmatrix} -\omega^2 + v_{px}^2 \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) + v_{pz}^2 \frac{\partial^2}{\partial z^2} & v_{pz}^2 (v_{pn}^2 - v_{px}^2) \left( \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial z^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^2 \partial z^2} \right) \\ -I & v_{px}^2 \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) + v_{pz}^2 \frac{\partial^2}{\partial z^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \\ 0 \end{bmatrix}$$

[식 3]

$$\begin{bmatrix} -\frac{\omega^2}{v_{pz}^2} + (1+2\varepsilon) \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} & 2(\delta - \varepsilon) \left( \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial z^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^2 \partial z^2} \right) \\ -I & (1+2\varepsilon) \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \\ 0 \end{bmatrix}$$

[식 4]

$$\mathbf{S}(\mathbf{x}, \omega) \mathbf{u}(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \omega) = \sum_{\mathbf{x}_s} \varphi(\mathbf{x}, \mathbf{x}_s, \mathbf{p}, \omega) f(\omega) \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_s)$$

( $\omega$  : 각주파수;  $v_{pz}$  : P파의 수직속도;  $v_{px} = v_{pz} \sqrt{1+2\varepsilon}$  : P파의 수평속도;  $v_{pn} = v_{pz} \sqrt{1+2\delta}$  : P파의 시간차(moveout) 속도;  $v_{sz}$  : sv파의 수직속도;  $\varepsilon, \delta$  : 톰슨(Thomsen)의 이방성변수; I : 단위행렬; f : 송신원 ; P : 파동장 ; Q : 가상파동장 ; S : 식 2 또는 식 3의 좌변행렬 ; u : P와 Q로 구성된 파동장 행렬 ;  $\mathbf{x}_s$  : 송신원의 위치 ;  $\psi$  : 지수함수)

### 청구항 5

삭제

### 청구항 6

제 1 항에 있어서,

상기 (c) 단계는,

상기 P파의 수직속도의 민감도가 상대적으로 강하게 나타나는 상기 파선변수의 절대값이 작은 영역을 제외하고  
 동시 역산하는 것을 특징으로 하는,

전파형 역산기법.

### 발명의 설명

### 기술 분야

본 발명은 평면파를 이용한 이방성 매질에서의 전파형 역산방법으로써, 구체적으로는 셀기반 유한차분법을 이용

[0001]

한 순수음향파동방식과 평면파 조건을 이용하여 계산 시간을 단축시켜 역산 효율을 증대하고, 평면파의 입사각에 따른 민감도를 분석하여 순차적 다변수 역산과 동시 다변수 역산이 복합적으로 활용되는 전파형 역산방법에 관한 것이다.

**배경 기술**

- [0003] 이방성 매질에서의 다변수 역산 기법은 비선형성, 위치 불량성(ill-posedness), 지역해에 빠질 가능성을 가지고 있기 때문에 적절한 역산 변수조합의 선정과 전략이 중요하다.
- [0004] 또한, 이방성 역산시 탄성 파동방정식을 사용하면 역산을 수행 시 상당한 계산 시간과 메모리를 필요로 하고, 유사 음향파동방정식을 사용한 경우 S파 잡음 제거를 위한 추가적인 기법이 필요한 문제가 있다.
- [0005] 역산 기법에 있어 순차적 역산기법의 경우 나머지 역산변수를 고정하고 한 변수를 역산하고, 그 다음으로 업데이트 된 변수를 고정하고 다른 변수를 역산하게 되는데 각 변수 역산 시 나머지 변수의 오차가 영향을 미치기 때문에 정확한 역산결과를 얻기가 힘들고 역산 횟수가 증가한다.
- [0006] 동시 역산의 경우 각 변수의 업데이트량을 조절하는 계수를 구하기가 어려워 역산의 안정성이 떨어지는 경우가 많아 결과가 부정확하다.

**선행기술문헌**

**특허문헌**

- [0008] (특허문헌 0001) JP 4465404 B2

**발명의 내용**

**해결하려는 과제**

- [0009] 상기 문제점을 해결하기 위해, 본 발명에 따른 평면파를 이용한 이방성 매질에서의 전파형 역산방법은 이방성 역산을 수행하면서 쉘기반 유한차분법을 이용한 순수음향파동방정식과 평면파 조건을 이용하여 계산 시간을 단축시켜 역산 효율을 증대시키고, 평면파의 입사각에 따른 민감도를 분석하여 순차적 다변수 역산과 동시 다변수 역산이 복합적으로 활용되는 역산방법을 제한하는 것을 목적으로 한다.
- [0011] 본 발명의 해결과제는 이상에서 언급된 것들에 한정되지 않으며, 언급되지 아니한 다른 해결과제들은 아래의 기재로부터 당해 기술분야에 있어서의 통상의 지식을 가진 자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

**과제의 해결 수단**

- [0013] 상기 목적을 달성하기 위해, 본 발명은 (a)파선변수(ray-parameter)의 범위에 따른 P파 수직속도와 이방성변수의 민감도를 분석하는 단계; (b)다른 변수를 고정하고 민감도가 가장 큰 P파의 수직속도를 먼저 순차 역산하는 단계; (c) (b)단계에서 도출된 P파의 수직속도와 수평속도를 동시 역산하는 단계;를 포함한다.
- [0014] 본 발명에서 순수음향파동방정식은 한 점의 주위를 둘러싼 네 셀의 물성정보를 이용한 쉘기반 유한차분법을 이용하여 표현되는 것이 바람직하다.
- [0015] 본 발명에서 순수음향파동방정식의 4차 미분항은 하기 식 1로 표현되는 것이 바람직하다.
- [0016] [식 1]

$$k \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial z^2} \approx \frac{1}{(\Delta x \Delta z)^2} \cdot \frac{(k_1 + k_2 + k_3 + k_4)}{4} \left[ u_{i+1,j+1} - 2u_{i,j+1} + u_{i-1,j+1} - 2u_{i+1,j} + 4u_{i,j} - 2u_{i-1,j} + u_{i+1,j-1} - 2u_{i,j-1} + u_{i-1,j-1} \right]$$

- [0017]

[0018] ( $\omega$  : 각주파수;  $v_{pz}$  : P파의 수직속도;  $v_{px} = v_{pz} \sqrt{1+2\varepsilon}$  : P파의 수평속도;  $v_{pn} = v_{pz} \sqrt{1+2\delta}$  : P파의 시간차(moveout) 속도;  $v_{sz}$  : sv파의 수직속도;  $k$  : 절점 (i, j)번째에 인접한 셀의 물성정보인  $v_{pz}$ ,  $\varepsilon$ ,  $\delta$  과 같은 음향파동속도와 이방성 파라미터; U : 파동장 )

[0019] 본 발명에서 파라미터는 하기 식 2 또는 식 3의 행렬항이 하기 식 4의 우변에 의해 대체되어 정의되는 것이 바람직하다.

[0021] [식 2]

$$\begin{bmatrix} -\omega^2 + v_{px}^2 \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) + v_{pz}^2 \frac{\partial^2}{\partial z^2} & v_{pz}^2 (v_{pn}^2 - v_{px}^2) \left( \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial z^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^2 \partial z^2} \right) \\ -I & v_{px}^2 \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) + v_{pz}^2 \frac{\partial^2}{\partial z^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \\ 0 \end{bmatrix}$$

[0022]

[0024] [식 3]

$$\begin{bmatrix} -\frac{\omega^2}{v_{pz}^2} + (1+2\varepsilon) \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} & 2(\delta - \varepsilon) \left( \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial z^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^2 \partial z^2} \right) \\ -I & (1+2\varepsilon) \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \\ 0 \end{bmatrix}$$

[0025]

[0027] [식 4]

$$\mathbf{S}(\mathbf{x}, \omega) \mathbf{u}(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \omega) = \sum_{x_s} \varphi(\mathbf{x}, \mathbf{x}_s, \mathbf{p}, \omega) f(\omega) \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_s)$$

[0028]

[0029] ( $\omega$  : 각주파수;  $v_{pz}$  : P파의 수직속도;  $v_{px} = v_{pz} \sqrt{1+2\varepsilon}$  : P파의 수평속도;  $v_{pn} = v_{pz} \sqrt{1+2\delta}$  : P파의 시간차(moveout) 속도;  $v_{sz}$  : sv파의 수직속도;  $\varepsilon$ ,  $\delta$  : 톰슨(Thomsen)의 이방성변수; I : 단위행렬; f : 송신원 ; P : 파동장 ; Q : 가상파동장 ; S : 식 2 또는 식 3의 좌변행렬 ; U : P와 Q로 구성된 파동장 행렬 ;  $X_s$  : 송신원의 위치 ;  $\psi$  : 지수함수)

[0030] 본 발명에서 (b) 단계는 역산결과가 적절수렴치 도달 시까지 전체 파선변수 영역을 이용하여 반복 역산하는 것이 바람직하다.

[0031] 본 발명에서 (c) 단계는 P파의 수직속도의 민감도가 상대적으로 강하게 나타나는 파선변수의 절대값이 작은 영역을 제외하고 역산하는 것이 바람직하다.

### 발명의 효과

[0033] 본 발명에 따른 평면파를 이용한 이방성 매질에서의 전파형 역산방법은 역산과정의 시간을 단축시켜 역산 효율을 증대시킬 수 있는 효과가 있다.

[0035] 본 발명의 효과는 이상에서 언급된 것들에 한정되지 않으며, 언급되지 아니한 다른 효과들은 아래의 기재로부터 당해 기술분야에 있어서 통상의 지식을 가진 자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

### 도면의 간단한 설명

[0037] 도 1은 본 발명의 제 1 실시예에 따른 순수음향파동모델링 방법의 순서도이다.

도 2는 도 1에 도시된 이방성 매질에서 S파가 분리된 순수음향파동방정식을 표현하는 순서도이다.

도 3은 본 발명의 제 1 실시예에 따른 순수음향파동모델링 방법에서 셀(cell)안에 물성정보가 포함된 셀기반 격자세트(cell-based grid sets)를 나타내는 도이다.

도 4는 본 발명의 제 1 실시예에 따른 순수음향파동모델링 방법에서 상반성을 비교하기 위한 속도모델을 나타내는 도이다.

도 5a는 각 송,수신기쌍에서 획득한 탄성과 파동장을 일반적인 유한차분법을 사용한 순수음향파동모델을 사용하여 나타낸 도이다.

도 5b는 각 송,수신기쌍에서 획득한 탄성과 파동장을 본 발명의 일 실시예에 따른 순수음향파동모델을 사용하여 나타낸 도이다.

도 6은 본 발명의 제 2 실시예에 따른 전파형 역산방법의 순서도이다.

도 7a는  $0.3 \leq \|p\| \leq 0.4$  범위의 파선변수에 따른 P파 수직속도 민감도를 나타낸 도이다.

도 7b는  $0.2 \leq \|p\| \leq 0.3$  범위의 파선변수에 따른 P파 수직속도 민감도를 나타낸 도이다.

도 7c는  $0.1 \leq \|p\| \leq 0.2$  범위의 파선변수에 따른 P파 수직속도 민감도를 나타낸 도이다.

도 7d는  $\|p\| \leq 0.1$  범위의 파선변수에 따른 P파 수직속도 민감도를 나타낸 도이다.

도 8a는  $0.3 \leq \|p\| \leq 0.4$  범위의 파선변수에 따른 P파 수평속도 민감도를 나타낸 도이다.

도 8b는  $0.2 \leq \|p\| \leq 0.3$  범위의 파선변수에 따른 P파 수평속도 민감도를 나타낸 도이다.

도 8c는  $0.1 \leq \|p\| \leq 0.2$  범위의 파선변수에 따른 P파 수평속도 민감도를 나타낸 도이다.

도 8d는  $\|p\| \leq 0.1$  범위의 파선변수에 따른 P파 수평속도 민감도를 나타낸 도이다.

도 9a는  $0.3 \leq \|p\| \leq 0.4$  범위의 파선변수에 따른 P파 시간차속도 민감도를 나타낸 도이다.

도 9b는  $0.2 \leq \|p\| \leq 0.3$  범위의 파선변수에 따른 P파 시간차속도 민감도를 나타낸 도이다.

도 9c는  $0.1 \leq \|p\| \leq 0.2$  범위의 파선변수에 따른 P파 시간차속도 민감도를 나타낸 도이다.

도 9d는  $\|p\| \leq 0.1$  범위의 파선변수에 따른 P파 시간차속도 민감도를 나타낸 도이다.

**발명을 실시하기 위한 구체적인 내용**

[0038] 본 발명의 구체적인 설명에 앞서 후술되는 내용 중, ‘상반성’은 송-수신기의 각 위치가 서로 바뀌어도 동일한 탄성과 탐사자료를 얻을 수 있다는 특성을 뜻한다.

[0039] 또한, 본 발명의 제 1 실시예인 순수음향파동모델링 방법은, 지하매질구조를 추정하기 위한 장치에서 지하 매질을 대상으로 측정된 데이터와 상기 지하 매질에 대한 초기 모델을 모델링한 모델링 데이터를 획득하는 데이터 획득부에서 수행된다.

[0040] 또한, 본 발명의 제 2 실시예인 전파형 역산방법은 데이터획득부를 통해 획득된 데이터들을 이용하여 파형역산을 수행하는 파형역산부가 수행한다.

[0041]

[0042] 이하, 도 1 내지 도 3을 참조하여, 본 발명의 제 1 실시예에 따른 순수음향파동모델링 방법에 대하여 설명하도

록 한다.

[0043] 도 1 은 본 발명의 제 1 실시예에 따른 순수음향파동모델링 방법의 순서도이며, 도 2는 도 1에 도시된 이방성 매질에서 S파가 분리된 순수음향파동방정식을 설정하는 순서도이다.

[0044] 도 3은 본 발명의 제 1 실시예에 따른 순수음향파동모델링 방법에서 셀(cell) 안에 물성정보가 포함된 셀 기반 격자세트(grid set)를 나타내는 도이다.

[0045] 본 발명의 제 1 실시예는 이방성 매질에서의 파동전파를 모사하기 위한 순수 음향파동 모델링 방법으로써, 도 1 에 도시된 바와 같이, 이방성 매질에서의 S파가 분리된 순수음향파동방정식을 표현하는 단계(S110)를 포함한다.

[0046] 그리고 순수음향파동방정식을 행렬형태로 표현하는 단계(S120), 행렬형태로 표현된 순수음향파동방정식을 유한 차분법으로 표현하는 단계를 포함한다.(S130)

[0047] 우선, 이방성 매질에서 P파와 SV파의 분산관계방정식은 다음과 같이 표현된다.(S111)

[0048] [수학식 1]

$$-\omega^4 = -\left[ \left( v_{px}^2 + v_{sz}^2 \right) \left( k_x^2 + k_y^2 \right) + \left( v_{pz}^2 + v_{sz}^2 \right) k_z^2 \right] \omega^2 + v_{px}^2 v_{sz}^2 \left( k_x^2 + k_y^2 \right)^2 + v_{pz}^2 v_{sz}^2 k_z^4 + \left[ v_{pz}^2 \left( v_{px}^2 - v_{pn}^2 \right) + v_{sz}^2 \left( v_{pz}^2 + v_{pn}^2 \right) \right] \left( k_x^2 + k_y^2 \right) k_z^2,$$

[0049]

[0050] 여기서  $\omega$  는 각주파수;  $v_{pz}$  는 P파의 수직속도;  $v_{px} = v_{pz} \sqrt{1+2\varepsilon}$  는 P파의 수평속도;  $v_{pn} = v_{pz} \sqrt{1+2\delta}$  는 P파의 시간차(moveout)속도;  $v_{sz}$  는 sv파의 수직속도;  $\varepsilon$ ,  $\delta$  는 톰슨(Thomsen)의 이방성변수;  $k_x$ ,  $k_y$ ,  $k_z$  는 공간파동수이며, 후술되는 수학식에 동일하게 적용된다.

[0051] 이방성 매질에서의 S파를 배제한 유사음향파 가정(the pseudoacoustic approximation) 에 적용하기 위해, 수학식 1에서  $v_{sz}$  는 0으로 설정되며, 수학식 1은 다음과 같이 표현된다.

[0052] [수학식 2]

$$-\omega^4 = -\left[ v_{px}^2 \left( k_x^2 + k_y^2 \right) + v_{pz}^2 k_z^2 \right] \omega^2 + v_{pz}^2 \left( v_{px}^2 - v_{pn}^2 \right) \left( k_x^2 + k_y^2 \right) k_z^2$$

[0053]

[0054] 수학식 2로 표현된 분산관계방정식은 P파와 SV파 각각의 독립방정식으로 인수분해하여 다음과 같이 표현된다.(S112)

[0055] [수학식 3]

$$-\omega^2 = -\frac{1}{2} \left[ v_{px}^2 \left( k_x^2 + k_y^2 \right) + v_{pz}^2 k_z^2 \right] - \frac{1}{2} \sqrt{\left[ v_{px}^2 \left( k_x^2 + k_y^2 \right) + v_{pz}^2 k_z^2 \right]^2 + 4v_{pz}^2 \left( v_{pn}^2 - v_{px}^2 \right) \left( k_x^2 + k_y^2 \right) k_z^2},$$

[0056]

[0057] [수학식 4]



$$-\omega^2 = -\frac{1}{2} \left[ v_{px}^2 (k_x^2 + k_y^2) + v_{pz}^2 k_z^2 \right] + \frac{1}{2} \sqrt{\left[ v_{px}^2 (k_x^2 + k_y^2) + v_{pz}^2 k_z^2 \right]^2 + 4v_{pz}^2 (v_{pn}^2 - v_{px}^2) (k_x^2 + k_y^2) k_z^2}$$

[0058]

[0059] 수학식 3은 P파에 대한 독립방정식이며, 수학식 4는 SV파에 대한 독립방정식이다.

[0060] 본 발명은 P파에 관련된 요소만 고려하므로, 수학식 3은 1차 테일러 급수전개(the first-order Taylor series expansion)를 사용하여 다음과 같이 표현된다.(S113)

[0061] [수학식 5]

$$-\omega^2 \approx -\frac{1}{2} \left[ v_{px}^2 (k_x^2 + k_y^2) + v_{pz}^2 k_z^2 \right] - \frac{1}{2} \left[ v_{px}^2 (k_x^2 + k_y^2) + v_{pz}^2 k_z^2 \right]^2 \left\{ 1 + \frac{2v_{pz}^2 (v_{pn}^2 - v_{px}^2) (k_x^2 + k_y^2) k_z^2}{\left[ v_{px}^2 (k_x^2 + k_y^2) + v_{pz}^2 k_z^2 \right]^2} \right\}$$

[0062]

[0063] 또는,

[0064] [수학식 6]

$$-\omega^2 \approx -\left[ v_{px}^2 (k_x^2 + k_y^2) + v_{pz}^2 k_z^2 \right] - \frac{v_{pz}^2 (v_{pn}^2 - v_{px}^2) (k_x^2 + k_y^2) k_z^2}{v_{px}^2 (k_x^2 + k_y^2) + v_{pz}^2 k_z^2}$$

[0065]

[0066] 수학식 5 및 수학식 6으로 표현된 순수음향파동방정식은 S파가 배제되어 있다.

[0067] 따라서, 본 발명의 제 1 실시예에 따른 순수음향파동모델링 결과는 S파 인공물(artifacts)을 배제하는 후처리 단계를 필요로 하지 않는다.

[0068] 파수-주파수영역에서  $\omega$  로 표현된 각주파수는 푸리에 변환을 통해 공간-주파수영역에서 공간에 대한 편미분으로 변환되어, 순수음향파동방정식은 다음과 같이 표현된다.

[0069] [수학식 7]

$$\omega^2 P = v_{px}^2 \left( \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) + v_{pz}^2 \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} + \frac{v_{pz}^2 (v_{pn}^2 - v_{px}^2) \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2 \partial z^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2 \partial z^2} \right)}{v_{px}^2 \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) + v_{pz}^2 \frac{\partial^2}{\partial z^2}} P$$

[0070]

[0071] 여기서, P 는 파동장이다.

[0072] 수학식 7은 암시적 시간적분 기법(the implementation of the implicit time integration methods, Kim and Lim, 2007)를 이용하여 다음과 같이 두 가지 형식의 수학식으로 표현될 수 있다.

[0073] [수학식 8]

$$v_{px}^2 \left( \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q}{\partial y^2} \right) + v_{pz}^2 \frac{\partial^2 Q}{\partial z^2} = P$$

[0074]

[0075] [수학식 9]

$$\omega^2 P = v_{px}^2 \left( \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) + v_{pz}^2 \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} + v_{pz}^2 (v_{pn}^2 - v_{px}^2) \left( \frac{\partial^4 Q}{\partial x^2 \partial z^2} + \frac{\partial^4 Q}{\partial y^2 \partial z^2} \right)$$

[0076]

[0077] 여기서, Q는 가상파동장이다.

[0078] 수학식 8 및 수학식 9는 셀기반 유한차분법을 이용하여 해결할 수 있으며, 셀기반 유한차분법으로 근사하기 위해, 수학식 8 및 수학식 9는 다음과 같이 행렬형태로 표현된다.(S120)

[0079] [수학식 10]

$$\begin{bmatrix} -\omega^2 + v_{px}^2 \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) + v_{pz}^2 \frac{\partial^2}{\partial z^2} & v_{pz}^2 (v_{pn}^2 - v_{px}^2) \left( \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial z^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^2 \partial z^2} \right) \\ -I & v_{px}^2 \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) + v_{pz}^2 \frac{\partial^2}{\partial z^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \\ 0 \end{bmatrix}$$

[0080]

[0081] 또는,

[0082] [수학식 11]

$$\begin{bmatrix} -\frac{\omega^2}{v_{pz}^2} + (1+2\varepsilon) \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} & 2(\delta - \varepsilon) \left( \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial z^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^2 \partial z^2} \right) \\ -I & (1+2\varepsilon) \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \\ 0 \end{bmatrix}$$

[0083]

[0084] 여기서, I 는 단위행렬; f 는 송신원; P 는 파동장; Q 는 가상파동장이다.

[0085] 여기서, 종래 유한차분법은 시스템 행렬의 대칭성을 파괴할 수 있기 때문에, 수학식 8과 수학식 9의 편미분은 Min et al. (2004)이 제안한 셀기반 유한차분법에 의해 치환된다.

[0086] 도 3을 참조하면, 물성정보가 셀(cell) 내부에 정의되기 때문에 셀기반 유한차분법법은 자유표면에서 자유경계 조건을 다룬다.

[0087] 그러나, 일반적으로 알려진 셀기반 유한차분법은 1차 또는 2차 미분항을 다루며, 이방성 매질에서 순수음향파동 방정식은 4차 미분항을 가지고 있기 때문에, 한 점을 둘러싼 네가지 물성정보의 가중합을 이용하여 이 문제를 해결할 수 있다.

[0088] 따라서, 순수음향파동방정식의 4차 미분항은 다음과 같이 표현될 수 있다.(S130)

[0090] [수학식 12]

$$k \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial z^2} \approx \frac{1}{(\Delta x \Delta z)^2} \cdot \frac{(k_1 + k_2 + k_3 + k_4)}{4} [u_{i+1,j+1} - 2u_{i,j+1} + u_{i-1,j+1} - 2u_{i+1,j} + 4u_{i,j} - 2u_{i-1,j} + u_{i+1,j-1} - 2u_{i,j-1} + u_{i-1,j-1}]$$

[0091]

[0092] 여기서,  $k$  는 질점 (i, j)번째에 인접한 셀의 물성정보인  $v_{pz}$ ,  $\epsilon$ ,  $\delta$  과 같은 음향파동속도와 이방성 파라미터; U 는 파동장이다.

[0094] 이하, 도 4 및 도 5를 참조하여, 본 발명의 제 1 실시예에 따른 순수음향파동모델과 일반적인 유한차분법을 사용한 순수음향파동모델 결과를 비교하도록 한다.

[0095] 도 4는 본 발명의 제 1 실시예에 따른 순수음향파동모델과 일반적인 유한차분법을 사용한 순수음향파동모델의 상반성을 비교하기 위하여 가정된 속도모델을 나타내는 도이다.

[0096] 도 5a는 각 송,수신기쌍에서 획득한 탄성과 파동장을 일반적인 유한차분법을 사용한 순수음향파동모델을 사용하여 나타낸 도이며, 도 5b는 각 송,수신기쌍에서 획득한 탄성과 파동장을 본 발명의 일 실시예에 따른 순수음향파동모델을 사용하여 나타낸 도이다.

[0097] 도 4에 도시된 바와 같이, 본 발명의 제 1 실시예에 따른 순수음향파동모델과 일반적인 유한차분법을 사용한 순수음향파동모델을 비교하기 위하여 속도모델을 가정하고, 송신기와 수신기를 다음과 같이 (625 m, 62.5 m)와 (2500 m, 62.5 m)에 번갈아 위치시킨다.

**표 1**

[0099]

	Source (x, z)	Receiver (x, z)
Case1	(625 m, 62.5 m)	(2500 m, 62.5 m)
Case2	(2500 m, 62.5 m)	(625 m, 62.5 m)

[0101] 획득한 두 개의 탄성과 탐사자료를 비교한 결과는 다음과 같다.

[0102] 도 5a에 도시된 바와 같이, 일반적인 유한차분법을 사용한 순수음향파동모델인 경우, 탄성과 탐사자료의 상반성이 상당히 깨진 것을 알 수 있다.

[0103] 반면, 도 5b에 도시된 바와 같이, 본 발명의 일 실시예에 따른 순수음향파동모델인 경우, 상대적으로 상반성이 잘 유지되는 것을 확인할 수 있다.

[0105] 본 발명의 제 1 실시예에 따라 도출된 순수음향파동방정식은 후술되는 본 발명의 제 2 실시예에 따른 전파형 역산방법에 적용할 경우, 역산과정의 시간과 비용을 절감할 수 있는 효과를 얻을 수 있다.

[0106] 전파형 역산(waveform inversion)이란, 현장에서 실제 측정된 데이터를 이용하여 특정지역의 지하 매질구조에 관한 정보(예컨대, 측정 대상 지역에 대한 속도 모델 또는 밀도 모델)를 유추하는 과정을 말하며, 전술된 본 발명의 제 1 실시예는 이러한 파형 역산에서 해석자가 임의의 지하구조 모델을 설정한 후, 설정된 모델에 대한 이론값을 구하는 모델링 과정이다.

[0107] 구체적인 설명에 앞서, 본 발명의 제 2 실시예에 따른 전파형 역산방법은 전술된 제 1 실시예에 따라 도출된 순수음향파동방정식과 평면파 가정(Vigh and Starr, 2008)을 이용하였으며, 모든 주파수에 대한 동시 다변수역산방법과, 개별 주파수별 순차적 다변수역산기법을 이용하였다.

[0109] 이하, 도 6 내지 도 9를 참조하여, 이에 대한 역산방법에 대하여 살펴보도록 한다.

[0110] 도 6은 본 발명의 제 2 실시예에 따른 전파형 역산방법의 순서도이다.

[0111] 도 7a는  $0.3 \leq \| \mathbf{p} \| \leq 0.4$  범위의 파선변수에 따른 P파 수직속도 민감도를 나타낸 도이고, 도 7b는

$0.2 \leq \| \mathbf{p} \| \leq 0.3$  범위의 파선변수에 따른 P와 수직속도 민감도를 나타낸 도이다.

[0112] 도 7c는  $0.1 \leq \| \mathbf{p} \| \leq 0.2$  범위의 파선변수에 따른 P와 수직속도 민감도를 나타낸 도이고, 도 7d는  $\| \mathbf{p} \| \leq 0.1$  범위의 파선변수에 따른 P와 수직속도 민감도를 나타낸 도이다.

[0113] 도 8a는  $0.3 \leq \| \mathbf{p} \| \leq 0.4$  범위의 파선변수에 따른 P와 수평속도 민감도를 나타낸 도이고, 도 8b는  $0.2 \leq \| \mathbf{p} \| \leq 0.3$  범위의 파선변수에 따른 P와 수평속도 민감도를 나타낸 도이다.

[0114] 도 8c는  $0.1 \leq \| \mathbf{p} \| \leq 0.2$  범위의 파선변수에 따른 P와 수평속도 민감도를 나타낸 도이고, 도 8d는  $\| \mathbf{p} \| \leq 0.1$  범위의 파선변수에 따른 P와 수평속도 민감도를 나타낸 도이다.

[0115] 도 9a는  $0.3 \leq \| \mathbf{p} \| \leq 0.4$  범위의 파선변수에 따른 P와 시간차속도 민감도를 나타낸 도이고, 도 9b는  $0.2 \leq \| \mathbf{p} \| \leq 0.3$  범위의 파선변수에 따른 P와 시간차속도 민감도를 나타낸 도이다.

[0116] 도 9c는  $0.1 \leq \| \mathbf{p} \| \leq 0.2$  범위의 파선변수에 따른 P와 시간차속도 민감도를 나타낸 도이다.

[0117] 도 9d는  $\| \mathbf{p} \| \leq 0.1$  범위의 파선변수에 따른 P와 시간차속도 민감도를 나타낸 도이다.

[0118] 도 6에 도시된 바와 같이, 파선변수(p, ray-parameter)의 범위에 따른 P와 수직속도( $V_{pz}$ )와, P와 수직속도( $V_p$ )와 이방성변수( $\epsilon, \delta$ )의 관계로 정의되는 P와 수평속도( $v_{px} = v_{pz} \sqrt{1+2\epsilon}$ )와 P와 시간차속도( $v_{pn} = v_{pz} \sqrt{1+2\delta}$ )의 민감도를 분석하는 단계를 포함한다.(S210)

[0119] 그리고 다른 변수를 고정하고 민감도가 가장 큰 P와 수직속도( $V_{pz}$ )를 먼저 순차 역산하는 단계와(S220), 상기 순차 역산단계에서 도출된 P와 수직속도( $V_{pz}$ )와 P와 수평속도( $V_{px}$ )를 동시 역산하는 단계를 포함한다.(S240)

[0120] 파선변수(p)는 전술된 수학식 10과 수학식 11에 기재된 순수파동방정식의 행렬항이 다음 수학식 13의 우변에 의해 대체되어 정의된다.

[0122] [수학식 13]

$$\mathbf{S}(\mathbf{x}, \omega) \mathbf{u}(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \omega) = \sum_{\mathbf{x}_s} \varphi(\mathbf{x}, \mathbf{x}_s, \mathbf{p}, \omega) f(\omega) \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_s)$$

[0123]

[0124] 여기서, S는 [수학식 10] 또는 [수학식 11]의 좌변행렬; U는 P와 Q로 구성된 파동장 행렬;  $\mathbf{x}_s$ 는 송신원의 위치; p는 파선변수;  $\varphi$ 는 지수함수이다.

[0126] 도 7 내지 도 9를 참조하여, 여러 개의 파선변수(p) 범위에 따른 P와 수직속도( $V_{pz}$ ), P와 수평속도( $V_{px}$ ) 및 P와 시간차속도( $V_{pn}$ )의 민감도를 분석해 보면 다음과 같다.

[0127] 설명에 앞서, 도면 상에서 붉은색에 가까울수록 민감도가 높다는 것이고, 푸른색에 가까울수록 민감도가 낮다는 것이다.

[0128] 도 7에 도시된 바와 같이, P와 수직속도( $V_{pz}$ )의 경우 파선변수(p)의 절대값이 감소할수록 더 높은 민감도를 가진다.

[0129] 반면, 도 8 및 도 9에 도시된 바와 같이, 이방성변수( $\epsilon, \delta$ )와 P와 수직속도( $V_{pz}$ )의 관계로 정의되는 P와 수평속도( $V_{px}$ )와 P와 시간차속도( $V_{pn}$ )의 경우는 파선변수(p)의 절대값이 감소할수록 민감도가 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

[0130] 즉, 이러한 파선변수(p)의 특성을 이용하여, 다른 변수를 고정하고 민감도가 가장 큰 P와 수직속도( $V_{pz}$ )를 순차

역산하고, 이에 도출된 P와 수직속도(Vpz)와 P와의 수평속도(Vpx)를 동시 역산한다.

[0131] 우선, 다른 변수를 고정한 채로 민감도가 큰 P와 수직속도(Vpz)를 먼저 순차 역산한다.(S220)

[0132] 여기서, P와 수평속도(Vpx) 나 P와 시간차속도(Vpn)에 비해 P와 수직속도(Vpz)의 민감도가 상대적으로 크기 때문에 전체 과선변수영역을 이용하여 역산결과가 적절히 수렴할 때까지 반복역산을 수행한다.(S230)

[0133] 그리고, 도출된 P와 수직속도(Vpz)와 P와 수평속도(Vpx)를 동시 역산한다.(S240)

[0134] 이때, P와 수직속도(Vpz)의 민감도가 상대적으로 강하게 나타나는 과선변수(p)의 절대값이 작은 영역을 제외하고 역산을 수행한다.

[0135] 즉, 본 발명의 제 2 실시예에서는  $0.1 \leq \|p\| \leq 0.4$  영역만 역산에 포함한다.

[0136] 본 발명의 제 2 실시예에 따른 전파형 역산방법의 결과와 기존의 순차적, 동시 역산방법의 결과를 비교하기 위하여 다음과 같이 역산된 모델변수의 오차값을 정의할 수 있다.

[0138] [수학식 14]

$$E_m = \frac{(m_i - m_{true})^2}{(m_{true})^2}$$

[0139]

[0140] 여기서,  $E_m$  는 모델변수의 오차값;  $m_i$  와  $m_{true}$  은 각각 재구축된 모델변수와 실제 모델변수이다.

[0141] 기존의 순차적, 동시 역산방법과 본 발명의 제 2 실시예에 따른 전파형 역산방법의 결과는 다음과 같으며, 본 발명의 제 2 실시예에 따른 전파형 역산방법의 결과가 상대적으로 적은 오차를 보이는 것을 확인할 수 있다.

표 2

[0143]

	Vpz (%)	Vpx (%)	$\epsilon$ (%)
Sequential	0.155	0.136	19.2
Joint	0.202	0.221	29.1
Developed	0.125	0.115	15.4

[0145] 이와 같이, 상술된 본 발명의 제 1 실시예에 따른 순수음향과동모델링 방법은 탄성과 탐사자료의 상반성이 깨지는 것을 방지할 수 있는 효과를 얻을 수 있다.

[0146] 또한, 기존 방식에 비해 적은 메모리를 이용하여 순수음향과동방정식 모델링이 가능한 효과를 얻을 수 있다.

[0147] 또한, 상기 효과로 인하여, 모델링의 안정성을 획득할 수 있는 효과를 얻을 수 있다.

[0149] 상술된 본 발명의 제 2 실시예에 따른 전파형 역산방법은 역산과정의 시간을 단축시켜 역산 효율을 증대시킬 수 있는 효과가 있다.

[0151] 본 명세서에 개시된 실시예들은 본 발명의 기술적 사상을 한정하기 위한 것이 아니라 설명하기 위한 것으로, 이러한 실시예에 의하여 본 발명의 기술 사상의 범위가 한정되는 것이 아님은 자명하다.

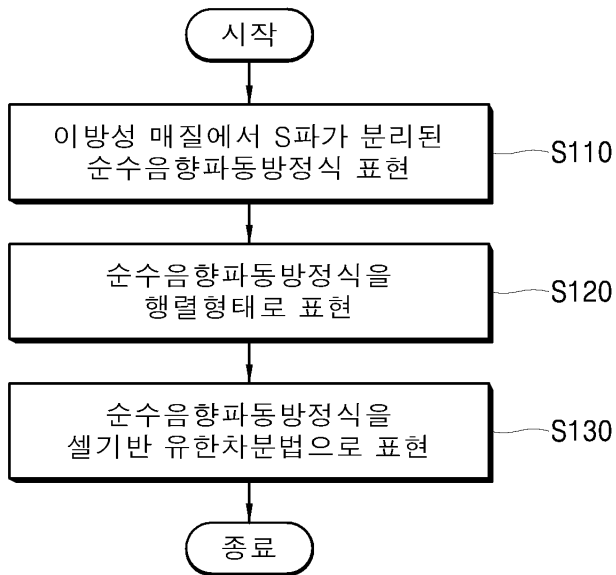
[0152] 본 발명의 명세서 및 도면에 포함된 기술적 사상의 범위 내에서 당해 기술분야에 있어서의 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 유추할 수 있는 변형예와 구체적인 실시예는 모두 본 발명의 권리범위에 포함되는 것으로 해석되어야 할 것이다.

**부호의 설명**

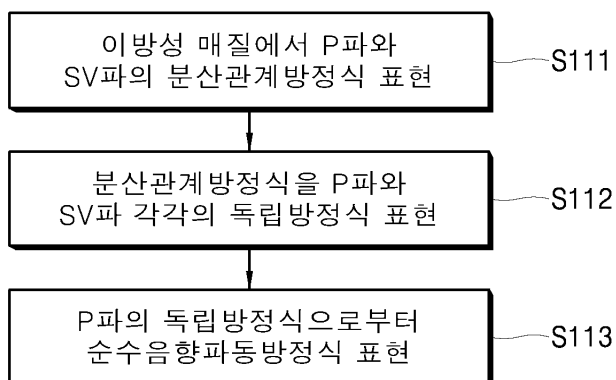
- [0154] S110 : S파가 분리된 순수음향파동방정식 표현
- S120 : 행렬형태로 표현
- S130 : 셸기반 유한차분법 표현
- S210 : 파선변수 범위에 따른 수직속도와 이방성변수의 민감도 분석
- S220 : 민감도가 가장 큰 수직속도 먼저 순차역산
- S230 : 역산결과값 적절수렴치 도달
- S240 : 수직속도, 수평속도 동시 역산

**도면**

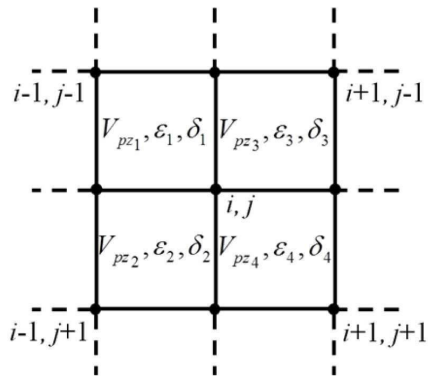
**도면1**



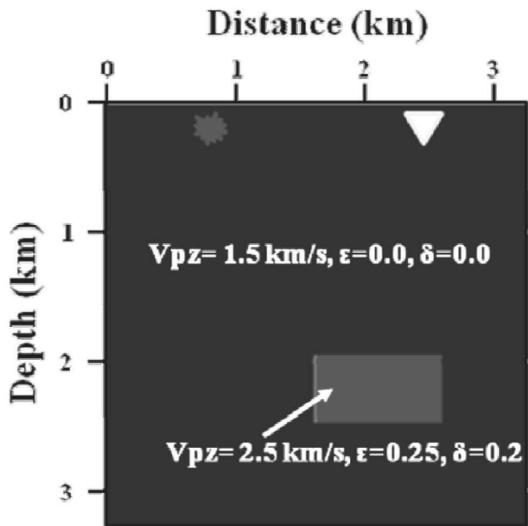
**도면2**



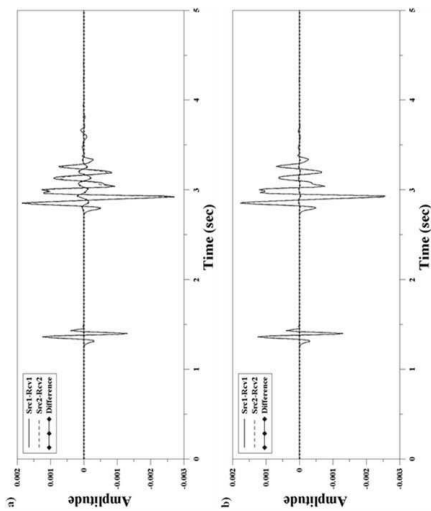
도면3



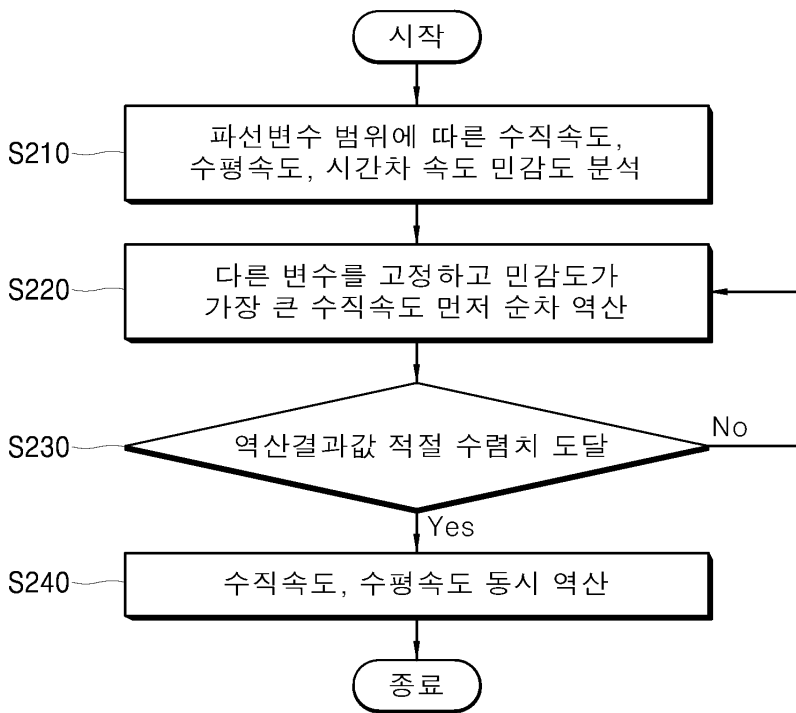
도면4



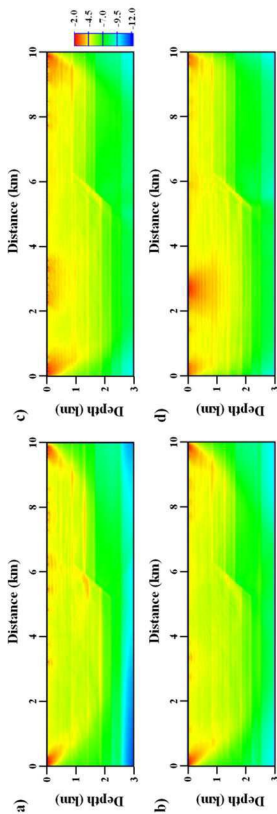
도면5



도면6

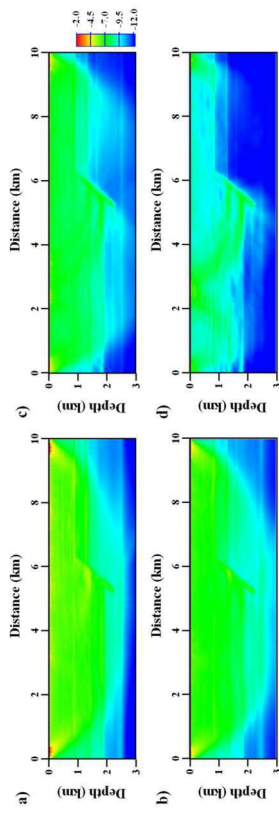


도면7





도면8



도면9

