



(72) 발명자

**정지호**

경기 성남시 분당구 구미로 50, 211동 1301호 (구미동, 무지개마을LG아파트)

**송광용**

서울 관악구 관악로40길 60, 126동 1204호 (봉천동, 관악현대아파트)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 20120005397

부처명 교육과학기술부

연구사업명 기초연구사업

연구과제명 스트레인 측정을 위한 광자결정 광섬유 개발 및 구조물 안전진단에의 응용 기술 개발(2N35530)

기여율 1/1

주관기관 한국연구재단

연구기간 2012.05.01 ~ 2013.04.30

---

**특허청구의 범위**

**청구항 1**

광원에 의해 출력된 광을 분할하여, 측대역 신호를 포함하는 제1 광신호, 및 제2 광신호를 생성하고, 상기 제2 광신호를 변조 신호를 이용하여 변조하며, 시험 광섬유의 양단에 상기 제1 광신호 및 변조된 상기 제2 광신호를 각각 인가하는 광변조부; 및

상기 시험 광섬유에 광학적으로 연결되어, 상기 시험 광섬유에서 상기 제1 광신호 및 변조된 상기 제2 광신호에 의하여 생성된 브릴루앙 산란광을 검출하는 광검출부를 포함하되,

상기 변조 신호는 제1 주파수에 따라 제1 구간 및 제2 구간이 교대로 반복 배치되어 이루어지며, 상기 제1 구간은 제2 주파수를 갖는 정현파 신호이고,

상기 광검출부는, 상기 제1 구간에 의해 변조된 상기 제2 광신호로부터 생성된 제1 브릴루앙 산란 신호와, 상기 제2 구간에 의해 변조된 상기 제2 광신호로부터 생성된 제2 브릴루앙 산란 신호의 차이를 검출하는 것을 특징으로 하는 분포형 광섬유 센서.

**청구항 2**

삭제

**청구항 3**

제 1항에 있어서,

상기 제2 주파수는 상기 제1 주파수보다 큰 것을 특징으로 하는 분포형 광섬유 센서.

**청구항 4**

제 1항에 있어서,

상기 변조 신호에서, 상기 제2 구간은 일정한 세기를 갖는 특징으로 하는 분포형 광섬유 센서.

**청구항 5**

제 1항에 있어서,

상기 광변조부는,

상기 제1 주파수를 갖는 구형파 형태의 기준 신호를 생성하는 제1 신호발생기;

상기 제2 주파수를 갖는 정현파 신호를 상기 기준 신호를 이용하여 세기 변조함으로써 상기 변조 신호를 생성하는 제2 신호발생기; 및

상기 제2 광신호를 상기 변조 신호를 이용하여 변조하는 광변조기를 포함하는 것을 특징으로 하는 분포형 광섬유 센서.

**청구항 6**

제 5항에 있어서,

상기 광검출부는, 상기 제1 신호발생기에 광학적으로 연결되며, 상기 기준 신호에 위상잠금된 상기 브릴루앙 산란광을 검출하는 위상잠금 증폭기를 포함하는 것을 특징으로 하는 분포형 광섬유 센서.

**청구항 7**

제 5항에 있어서,  
상기 광변조기는 위상 변조기인 것을 특징으로 하는 분포형 광섬유 센서.

**청구항 8**

제 1항에 있어서,  
상기 제1 광신호는 프로브광이며, 상기 제2 광신호는 펌프광인 것을 특징으로 하는 분포형 광섬유 센서.

**청구항 9**

광원에 의해 출력된 광을 분할하여, 측대역 신호를 포함하는 제1 광신호, 및 제2 광신호를 생성하는 단계;

제1 구간 및 제2 구간이 제1 주파수에 따라 교대로 반복 배치되어 이루어지며 상기 제1 구간은 제2 주파수를 갖는 정현파 신호인 변조 신호를 이용하여 상기 제2 광신호를 변조하는 단계;

상기 제1 광신호 및 변조된 상기 제2 광신호를 각각 시험 광섬유의 양단에 인가하는 단계; 및

상기 시험 광섬유에서 상기 제1 광신호 및 변조된 상기 제2 광신호에 의하여 생성된 브릴루앙 산란광을 검출하는 단계를 포함하되,

상기 브릴루앙 산란광을 검출하는 단계는,

상기 제1 구간에 의해 변조된 상기 제2 광신호로부터 생성된 제1 브릴루앙 산란 신호와, 상기 제2 구간에 의해 변조된 상기 제2 광신호로부터 생성된 제2 브릴루앙 산란 신호의 차이를 검출하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 분포형 광섬유 센서의 공간 분해능 향상 방법.

**청구항 10**

삭제

**청구항 11**

제 9항에 있어서,  
상기 제2 주파수는 상기 제1 주파수보다 큰 것을 특징으로 하는 분포형 광섬유 센서의 공간 분해능 향상 방법.

**청구항 12**

제 9항에 있어서,  
상기 변조 신호에서, 상기 제2 구간은 일정한 세기를 갖는 것을 특징으로 하는 분포형 광섬유 센서의 공간 분해능 향상 방법.

**청구항 13**

제 9항에 있어서,  
상기 제2 광신호를 변조하는 단계는,  
상기 제1 주파수를 갖는 구형파 형태의 기준 신호를 생성하는 단계; 및

상기 제2 주파수를 갖는 정현파 신호를 상기 기준 신호를 이용하여 세기 변조함으로써 상기 변조 신호를 생성하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 분포형 광섬유 센서의 공간 분해능 향상 방법.

**청구항 14**

제 13항에 있어서,

상기 브릴루앙 산란광을 검출하는 단계는, 상기 기준 신호에 위상잠금된 상기 브릴루앙 산란광을 검출하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 분포형 광섬유 센서의 공간 분해능 향상 방법.

**청구항 15**

제 13항에 있어서,

상기 제2 광신호를 변조하는 단계는, 상기 변조 신호를 이용하여 상기 제2 광신호를 위상 변조하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 분포형 광섬유 센서의 공간 분해능 향상 방법.

**청구항 16**

제 9항에 있어서,

상기 제1 광신호는 프로브광이며, 상기 제2 광신호는 펄스광인 것을 특징으로 하는 분포형 광섬유 센서의 공간 분해능 향상 방법.

**명세서**

**기술분야**

[0001] 실시예들은 분포형 광섬유 센서(distributed optical fiber sensor) 및 이의 공간 분해능 향상 방법에 대한 것으로서, 보다 구체적으로는 브릴루앙 광학적 공간영역 해석(Brillouin Optical Correlation Domain Analysis) 방식의 분포형 광섬유 센서의 공간 분해능을 향상시키기 위한 방법에 대한 것이다.

**배경기술**

[0002] 일반적으로 광섬유는 외부 환경, 예컨대, 온도나 응력 등과 같은 외부 물리량의 변화로 인한 광섬유 자체의 고유 특성의 변화가 민감하여 센서로 이용할 수 있다. 또한, 광섬유 자체의 특성상 외부 전자기파에 둔감하고 유해한 환경, 예컨대, 가스나 용액 등에 강하고 가볍고 유연하며 소형화가 가능하다. 이러한 장점들 때문에 광섬유는 포설이 용이하고 구조물에 장착하기 쉬운 구조로 되어 있어 센서용으로 매우 적합하다.

[0003] 광섬유 센서로는 광섬유 내의 코어의 굴절율을 변화시켜 제작한 광격자 센서가 있으나, 이는 격자가 새겨진 부분만 센서의 역할을 하기 때문에 분포형 광섬유 센서에 비해 상대적으로 취약하다. 또 다른 방식으로는 간섭형, 파장형, 및 산란형 센서가 있다. 이중 산란형 센서는 펄스 광원 또는 연속파(Continuous Wave) 광원을 사용하여, 광섬유에 작용하는 물리량에 따른 광섬유 내부의 후방 산란광을 측정함으로써 장거리 센싱이 가능하다.

[0004] 이러한 산란형 센서로는 레일레이(Rayleigh) 산란형 광섬유 센서, 라만(Raman) 산란형 광섬유 센서, 브릴루앙(Brillouin) 산란형 광섬유 센서 등이 있다. 레일레이 산란형 광섬유 센서는 펄스광이 광섬유 내부를 진행하는 중 광섬유의 밀도의 불균일 분포에 기인하여 발생하는 산란광을 측정하는 센서로, 펄스광의 세기에 비례하는 후방 산란광을 얻을 수 있다. 그러나, 레일레이 산란형 광섬유 센서는 외부의 온도 또는 변형률 변화에 민감하지 못하며, 특수한 광섬유의 굽힘이 발생하는 경우에만 사용할 수 있다. 라만 산란형 광섬유 센서와 브릴루앙 산란형 광섬유 센서는 모두 비선형 광산란을 이용하는 센서이다. 일 예로, 공개특허공보 제10-2009-0001405호는 감지 광섬유에서 발생하는 후방 산란광 중 라만 산란광과 브릴루앙 산란광을 측정하는 분포 광섬유 센서 시스템을 개시한다.

[0005] 라만 산란은 광섬유 내에서 빛이 전달될 때 분자 진동에 의하여 후방 산란 신호가 발생하는 현상을 지칭한다. 이때, 분자의 진동은 열적인 변화에 의해서만 변화하므로, 라만 산란형 광섬유 센서는 대부분 온도 센서로 사용되고 있다. 브릴루앙 산란형 광섬유 센서는, 외부에서 작용하는 온도 또는 응력 등에 따라 광섬유 고유의 브릴루앙 주파수 값이 변화하는데, 이러한 브릴루앙 주파수의 변화량을 구하여 외부 물리량 변화를 측정하는 센서이다. 광섬유 내에 발생하는 브릴루앙 산란은 빛이 광섬유 내에 진행할 때 음파와 결합하여 후방 산란 신호를 만드는 현상을 지칭하는데, 이러한 후방 산란 신호는 광섬유가 위치한 환경에 비례하므로 이를 이용하여 온도 및/또는 응력의 변화량을 측정할 수 있다.

[0006] 브릴루앙 산란을 이용한 분포형 광섬유 센서의 종류로는 브릴루앙 광학적 시간영역 반사율 측정(Brillouin Optical Time Domain Reflectometry; BOTDR) 방식, 브릴루앙 광학적 시간영역 분석(Brillouin Optical Time Domain Analysis; BOTDA) 방식, 및 브릴루앙 광학적 공간영역 해석(Brillouin Optical Correlation Domain Analysis; BOCDA) 방식 등이 있다. 이중 BOTDR 방식과 BOTDA 방식은 펄스 형태의 광원을 이용하여 브릴루앙 산란광을 관찰하는 방식으로, 장거리 센싱에 용이하지만 분해능이 제한되는 단점이 있다.

[0007] 이에 반해, BOCDA 방식은 공간 선택적으로 유도 브릴루앙 산란을 발생시켜 특정 지점에서만 물리적인 변화를 측정할 수 있으며, BOTDR방식이나 BOTDA 방식과 비교하면 장거리 계측은 어려우나 분해능은 개선된다. 그러나, BOCDA 방식의 분포형 광섬유 센서는 브릴루앙 이득 스펙트럼 상관점 주변에서 로컬 비트 스펙트럼(local beat spectrum)과의 컨볼루션(convolution)으로 인한 잡음 성분을 포함하게 되어 선평이 넓어지는 문제점이 있으며, 이러한 현상은 센서의 측정 동적 범위와 공간 분해능을 제한하게 된다.

**선행기술문헌**

**특허문헌**

[0008] (특허문헌 0001) 공개특허공보 제10-2009-0001405호

**발명의 내용**

**해결하려는 과제**

[0009] 본 발명의 일 측면에 따르면, 브릴루앙 광학적 공간영역 해석(Brillouin Optical Correlation Domain Analysis) 방식을 이용하여 물리적인 변형 및 온도 등을 측정할 수 있으며, 브릴루앙 이득 스펙트럼이 상관점 주변에서 잡음 성분을 포함하게 되어 선평이 넓어지는 문제를 해결하고 공간 분해능을 향상시킬 수 있는 분포형 광섬유 센서 및 이의 공간 분해능 향상 방법을 제공할 수 있다.

**과제의 해결 수단**

[0010] 일 실시예에 따른 분포형 광섬유 센서는, 광원에 의해 출력된 광을 분할하여, 측대역 신호를 포함하는 제1 광신호, 및 제2 광신호를 생성하고, 상기 제2 광신호를 변조 신호를 이용하여 변조하며, 시험 광섬유의 양단에 상기 제1 광신호 및 상기 제2 광신호를 각각 인가하는 광변조부; 및 상기 시험 광섬유에 광학적으로 연결되어, 상기 시험 광섬유에서 상기 제1 광신호 및 상기 제2 광신호에 의하여 생성된 브릴루앙 산란광을 검출하는 광검출부를 포함할 수 있다. 이때, 상기 변조 신호는 제1 구간 및 제2 구간이 제1 주파수에 따라 교대로 반복 배치되어 이루어지며, 상기 제1 구간은 제2 주파수를 갖는 정현파 신호일 수 있다.

[0011] 일 실시예에 따른 분포형 광섬유 센서의 공간 분해능 향상 방법은, 광원에 의해 출력된 광을 분할하여, 측대역 신호를 포함하는 제1 광신호, 및 제2 광신호를 생성하는 단계; 제1 구간 및 제2 구간이 제1 주파수에 따라 교대로 반복 배치되어 이루어지며 상기 제1 구간은 제2 주파수를 갖는 정현파 신호인 변조 신호를 이용하여 상기 제2 광신호를 변조하는 단계; 상기 제1 광신호 및 변조된 상기 제2 광신호를 각각 상기 시험 광섬유의 양단에 인가하는 단계; 및 상기 시험 광섬유에서 상기 제1 광신호 및 변조된 상기 제2 광신호에 의하여 생성된 브릴루앙 산란광을 검출하는 단계를 포함할 수 있다.

**발명의 효과**

[0012] 본 발명의 일 측면에 따른 분포형 광섬유 센서 및 이의 공간 분해능 향상 방법에 의하면, 브릴루앙 광학적 공간영역 해석(Brillouin Optical Correlation Domain Analysis) 방식을 이용하여 대형 건축물, 교량, 항공기, 열

차 등의 물리적인 변형 및 온도를 측정할 수 있다. 또한, 브릴루앙 산란광을 검출하기 위한 위상잠금(lock-in) 신호에 추가적인 변조를 수행함으로써, 좁은 선폭의 브릴루앙 이득 스펙트럼을 얻을 수 있어 공간 분해능을 향상시킬 수 있는 이점이 있다.

**도면의 간단한 설명**

- [0013] 도 1은 일 실시예에 따른 분포형 광섬유 센서의 개략도이다.
- 도 2a 내지 2c는 일 실시예에 따른 분포형 광섬유 센서에서 선폭이 좁아진 브릴루앙 이득 스펙트럼을 얻는 원리를 나타내는 그래프들이다.
- 도 3a는 종래의 분포형 광섬유 센서에서 위상잠금(lock-in) 신호를 얻기 위하여 사용된 초핑(chopping) 신호의 파형을 나타내는 그래프이다.
- 도 3b는 일 실시예에 따른 분포형 광섬유 센서에서 사용되는 변조 신호의 파형을 나타내는 그래프이다.
- 도 3c는 일 실시예에 따른 분포형 광섬유 센서에서 도 3b의 변조 신호를 이용하여 얻어지는 출력 신호를 나타낸 그래프이다.
- 도 4는 시험 광섬유의 예시적인 구성을 나타내는 개략도이다.
- 도 5a 내지 5d는 도 4에 도시된 시험 광섬유를 이용하여 종래의 분포형 광섬유 센서로부터 출력되는 브릴루앙 이득 스펙트럼을 나타내는 그래프들이다.
- 도 6a 내지 6d는 도 4에 도시된 시험 광섬유를 이용하여 일 실시예에 따른 분포형 광섬유 센서로부터 출력되는 브릴루앙 이득 스펙트럼을 나타내는 그래프들이다.

**발명을 실시하기 위한 구체적인 내용**

- [0014] 이하에서, 도면을 참조하여 본 발명의 실시예들에 대하여 상세히 살펴본다.
- [0015] 브릴루앙 광학적 공간영역 해석(Brillouin Optical Correlation Domain Analysis) 방식의 분포형 광섬유 센서(distributed optical fiber sensor)에서는, 시험 광섬유 내에서 서로 반대 방향으로 진행하는 펌프(pump)광 및 프로브(probe)광의 주파수 차이가 광섬유 고유의 브릴루앙 천이 주파수와 일치하거나 이에 근접하게 되면, 광섬유의 전 구간에서 유도 브릴루앙 산란 증폭이 일어나 프로브광의 세기가 증폭된다.
- [0016] 이때, 펌프광과 프로브광의 주파수가 공간적으로 사인(sin) 파형을 갖도록 광신호를 변조함으로써, 시험 광섬유 내의 특정 위치에서만 선택적으로 브릴루앙 산란 신호를 얻을 수 있다. 측정 지점은 펌프광과 프로브광을 생성하기 위한 레이저 광의 변조 주파수에 기초하여 결정될 수 있다. 펌프광과 프로브광 사이의 오프셋(offset) 주파수를 변화시키면서 브릴루앙 이득 스펙트럼을 측정할 수 있다. 시험 광섬유의 브릴루앙 천이 주파수는 외부에서 작용하는 온도 또는 응력 등 물리적인 특성에 의존하므로, 브릴루앙 이득 스펙트럼이 최대값을 갖는 주파수를 이용하여 시험 광섬유의 물리적인 특성 변화를 측정할 수 있다.
- [0017] 도 1은 일 실시예에 따른 분포형 광섬유 센서를 나타내는 개략도이다.
- [0018] 도 1을 참조하면, 일 실시예에 따른 분포형 광섬유 센서는 광변조부(20) 및 광검출부(50)를 포함할 수 있다. 또한, 분포형 광섬유 센서는 광원부(10) 및/또는 시험 광섬유(30)를 더 포함할 수도 있다. 광원부(10)는 광변조부(20)에 광을 인가할 수 있다. 시험 광섬유(30)는 광변조부(20) 및 광검출부(50)에 광학적으로 연결되어, 광경로 상에서 브릴루앙 산란을 이용하여 물리량의 변화를 측정하고자 하는 위치에 배치될 수 있다.
- [0019] 광원부(10)는 분포형 광섬유 센서에 사용될 광을 공급하기 위한 장치이다. 일 실시예에서, 광원부(10)는 분포형 궤환 레이저 다이오드(Distributed Feed-Back Laser Diode; DFB LD)(110) 및 신호발생기(120)를 포함할 수 있다. 신호발생기(120)를 이용하여 DFB LD(110)에 대한 공급 전류를 변조함으로써, 소정의 변조 주파수( $f_m$ )를 갖는 정현파 형태로 변조되며 변조 신호의 크기가  $\Delta f$ 인 광을 얻을 수 있다. 그러나 이는 예시적인 것으로서, 다른 실시예에서 광원부(10)는 다른 상이한 방식의 레이저 발생 장치를 포함하여 구성될 수도 있다.
- [0020] 광변조부(20)는 광원부(10)로부터 변조된 광을 인가받고, 이로부터 제1 광신호 및 제2 광신호를 생성하여 시험 광섬유(30)의 양단에 인가할 수 있다. 일 실시예에서, 광변조부(20)는 광분배기(210) 및 광변조기(220) 및 광변조기(280)를 포함할 수 있다. 광분배기(210)는 광원부(10)로부터 변조된 광을 수신하고, 수신된 광을 제1 광신호 및 제2 광신호를 생성하기 위한 두 광신호로 분기할 수 있다. 예컨대, 제1 광신호는 프로브광이며, 제2 광신

호는 펌프광일 수 있다.

- [0021] 광변조기(220)는 광분배기(210)와 시험 광섬유(30)의 한쪽 끝단 사이에 광학적으로 연결되어, 광분배기(210)로부터 인가된 광을 이용하여 측대역(sideband) 신호를 포함하는 제1 광신호를 생성할 수 있다. 제1 광변조기(220)는 신호발생기(225)로부터 신호를 수신하며, 기존의 주파수에서 신호발생기(225)로부터 수신된 오프셋(offset) 주파수( $\nu_B$ )만큼 주파수가 천이된 측대역 신호를 포함하도록 제1 광신호를 변조시킬 수 있다. 예컨대, 제1 광변조기(220)는 단측과대 변조기(single sideband modulator)일 수 있으나, 이에 한정되는 것은 아니다.
- [0022] 한편, 광분배기(210)에서 분기된 다른 광신호는 제2 광신호가 된다. 광변조기(280)는 광분배기(210)와 시험 광섬유(30)의 다른쪽 끝단 사이에 광학적으로 연결되어, 광분배기(210)로부터 인가된 제2 광신호를 소정의 변조 신호에 따라 변조할 수 있다. 제2 광변조기(280)는 신호발생기(285) 및 신호발생기(286)를 통해 변조 신호를 수신하며, 제2 광신호를 변조 신호에 따라 변조할 수 있다. 변조 신호에 대해서는 상세히 후술한다. 일 실시예에서, 제2 광변조기(280)는 위상 변조기(phase modulator)일 수 있으나, 이에 한정되는 것은 아니다.
- [0023] 이상과 같은 구성의 결과, 시험 광섬유(30) 내에서 제1 광신호 및 제2 광신호는 서로 반대 방향으로 진행된다. 이때, 제2 광신호는 주파수( $\nu_0$ )를 중심으로 광원부(10)의 변조 주파수( $f_m$ )의 정현파로 광주파수 변조된 신호이며, 제1 광신호는 상기 주파수( $\nu_0$ )로부터 오프셋 주파수( $\nu_B$ )만큼 하향천이된 주파수( $\nu_0 - \nu_B$ )를 중심으로 광원부(10)의 변조 주파수( $f_m$ )의 정현파로 광주파수 변조된 신호이다. 주파수( $\nu_0$ ) 및 오프셋 주파수( $\nu_B$ )의 값은 광섬유에 따라 다르며, 특정 수치에 한정되지 않는다. 한편 제 1광신호와 제 2광신호가 서로 반대방향으로 시험 광섬유(30)에 입사되어 진행하면 광섬유내 특정위치(상관점)에서 두 광신호의 광주파수 차이가 시간에 무관하게 일정하게 된다. 이때 두 광신호의 광주파수 차이가 브릴루앙 천이주파수와 일치하는 경우 브릴루앙 이득이 항상 최대가 된다. 상기 상관점은 광섬유내 공간영역에서 주기적으로 분포하는데 이때 변조 주파수( $f_m$ )를 바꾸면 상관점의 위치를 조절할 수 있다.
- [0024] 일 실시예에서, 광변조부(20)는 시험 광섬유(30)와 광학적으로 연결되는 지연 광섬유(270)를 포함할 수 있다. 일반적인 브릴루앙 공간영역 해석 방식에서 상관점들은 변조 주파수( $f_m$ )를 바꾸어 위치를 조절할 수 있다. 하지만 전체 광 경로를 구성하는 광섬유의 정 중앙에서는 변조 주파수( $f_m$ )를 변경하여도 브릴루앙 이득 피크의 위치가 변하지 않으며, 광 섬유의 정 중앙을 기준으로 양쪽의 피크들의 위치가 변조 주파수( $f_m$ )에 따라 조절된다. 따라서, 지연 광섬유(270)가 없는 경우에는 상관점의 위치조절이 불가능한 피크가 시험 광섬유(30)의 중앙에 위치하게 된다.
- [0025] 이러한 이유 때문에 지연 광섬유(270)를 사용하며, 지연 광섬유(270)의 길이를 적절하게 조절함으로써 전체 광 경로의 정 중앙에서 양쪽에 있는 브릴루앙 이득 피크 중 어느 하나가 시험 광섬유(30)상에 위치하도록 할 수 있다. 또한, 지연 광섬유(270)는 광순환기(510)를 통해 시험 광섬유(30)에 광학적으로 연결되며, 제1 광신호는 광순환기(510)에 의하여 분기되어 지연 광섬유(270)에 입력되지 않으므로, 시험 광섬유(30)에서만 브릴루앙 산란 광이 발생될 수 있다. 일 실시예에서, 지연 광섬유(270)는 시험 광섬유(30)와 동일한 재질로 이루어질 수도 있다.
- [0026] 또한 일 실시예에서, 광변조부(20)는 하나 이상의 편광조절기(240, 245)를 포함할 수도 있다. 예컨대, 광변조부(20)는 광분배기(210)와 제1 광변조기(220) 사이에 광학적으로 연결되는 편광조절기(240) 및 광분배기(210)와 제2 광변조기(280) 사이에 광학적으로 연결되는 편광조절기(245)를 포함할 수도 있다. 제1 광신호와 제2 광신호의 편광이 일치할 때 유도 브릴루앙 산란 증폭이 최대로 일어나므로, 하나 이상의 편광조절기를 이용하여 제1 광신호 및 제2 광신호의 편광을 동일하게 조절할 수 있다.
- [0027] 또한 일 실시예에서, 광변조부(20)는 편광스위치(Polarization Switch; PSW)(230)를 포함할 수도 있다. 편광스위치(230)는 광변조기(220)와 시험 광섬유(30)사이에 광학적으로 연결되어, 제1 광신호의 편광을 주기적으로 변경할 수 있다. 예컨대, 편광스위치(230)는 신호발생기(235)로부터 신호를 수신하며, 수신된 신호에 따라 제1 광신호의 편광을 한 번은 0도, 다른 한 번은 90도로 번갈아 회전시킬 수 있다. 전술한 0도 및 90도의 편광 각도는 단지 예시적인 것으로서, 다른 실시예에서 편광스위치(230)는 제1 광신호의 편광을 이와 상이한 다른 각도로 주기적으로 변경할 수도 있다.
- [0028] 제1 광신호와 제2 광신호의 편광이 일치할 때 유도 브릴루앙 산란 증폭이 일어나나, 제1 광신호 및/또는 제2 광신호의 편광은 시간 및 공간에 따라 변화할 수 있다. 따라서, 편광스위치(230)를 이용하여 제1 광신호의 편광을

변화시켜가면서 측정을 수행하고, 측정된 값의 평균값을 이용함으로써 편광 문제를 해결할 수 있다.

- [0029] 또한 일 실시예에서, 광변조부(20)는 하나 이상의 광증폭기(250, 255)를 포함할 수도 있다. 예를 들어, 광변조부(20)는 광변조기(220)와 시험 광섬유(30) 사이에 광학적으로 연결되는 광증폭기(250)를 포함할 수 있다. 또한, 광변조부(20)는 지연 광섬유(270)와 광순환기(510) 사이에 광학적으로 연결되는 광증폭기(255)를 포함할 수도 있다. 광증폭기(250) 및 광증폭기(255)는 각각 제1 광신호 및 제2 광신호의 크기를 증가시키는 역할을 할 수 있으며, 특히, 광증폭기(255)는 펌프 신호의 브릴루앙 산란 효과를 발생시키기 위하여 펌프 신호의 세기를 증폭시켜 브릴루앙 임계치 이상으로 만드는 역할을 한다.
- [0030] 또한 일 실시예에서, 광변조부(20)는 광고립기(260)를 포함할 수도 있다. 광고립기(260)는 시험 광섬유(30)와 광변조기(220) 사이에 광학적으로 연결되어, 고출력의 제2 광신호가 지연 광섬유(270) 및 시험 광섬유(30)를 거쳐 광변조기(220)로 진행하는 것을 차단하는 역할을 할 수 있다.
- [0031] 광검출부(50)는 시험 광섬유(30)에서 발생한 브릴루앙 산란광을 검출하기 위한 장치이다. 광검출부(50)는 광순환기(510), 포토다이오드(Photo Diode; PD)(520) 및 위상잠금 증폭기(Lock-in amplifier)(530)를 포함할 수 있다. 광순환기(510)는 시험 광섬유(30) 및 지연 광섬유(270) 사이에 광학적으로 연결되어, 시험 광섬유(30)에서 발생된 브릴루앙 산란광을 분기할 수 있다. PD(520)는 광순환기(510)에 의해 분기된 산란광을 수신하고 이를 전기 신호로 변환할 수 있다.
- [0032] 위상잠금 증폭기(530)는 변환된 전기 신호를 수신하고, 제2 광신호의 변조를 위하여 신호발생기(285)에서 발생된 기준 신호를 이용하여 브릴루앙 산란광을 단속적으로 검출할 수 있다. 위상잠금 증폭기(530)의 기능 및 이에 의해 검출되는 브릴루앙 이득 스펙트럼에 대해서는 상세히 후술한다. 위상잠금 증폭기(530)는 교류신호 채널(AC signal channel), 믹서(mixer), 직류 증폭기(DC amplifier) 및 저역통과 필터(low-pass filter) 등으로 구성될 수 있으나, 이에 한정되는 것은 아니다.
- [0033] 광검출부(50)는 데이터 수집부(data acquisition; DAQ)(540) 및 개인용 컴퓨터(Personal Computer; PC)(550)를 포함할 수도 있다. 위상잠금 증폭기(530)에서 출력된 직류 전압 신호를 DAQ(540) 및 PC(550)에서 수신하고, 수신된 신호를 브릴루앙 이득 스펙트럼의 형태로 변환하여 시험 광섬유(30)의 물리적인 변화를 측정할 수 있다. 그러나 이는 예시적인 것으로서, 다른 실시예에서는 다른 상이한 하나 이상의 데이터 처리 수단을 이용하여 신호 처리 및 분석을 수행할 수도 있다.
- [0034] 이상과 같은 구성에 의하여, 시험 광섬유(30) 내에서는 제1 광신호 및 제2 광신호가 서로 반대 방향으로 진행하게 된다. 제1 광신호는 오프셋 주파수만큼 주파수가 천이된 측대역 신호를 포함하므로, 측대역 신호와 제2 광신호의 주파수 차이가 시험 광섬유(30) 고유의 브릴루앙 천이 주파수와 일치하거나 또는 이에 근접하도록 조절할 경우 시험 광섬유(30)에서 유도 브릴루앙 산란이 일어나 시험 광섬유(30)의 특정 구간에서 광신호가 증폭될 수 있다. 증폭된 광신호를 광검출부(50)에서 검출하여 브릴루앙 이득 스펙트럼을 구성할 수 있으며, 이를 이용하여 시험 광섬유(30)의 특정 지점에서 물리적인 특성 변화를 측정할 수 있다.
- [0035] 도 2a 내지 2c는 일 실시예에 따른 분포형 광섬유 센서에서 선폭이 좁아진 브릴루앙 이득 스펙트럼을 얻는 원리를 나타내는 그래프들이다.
- [0036] 도 2a를 참조하면, 제2 광신호가 변조되지 않을 경우, 브릴루앙 산란에만 기인하는 브릴루앙 이득 신호(2001)는 도시된 것과 같은 형태를 가질 수 있다. 그러나, 시험 광섬유(Fiber Under Test; FUT)의 상관점 주변에서 발생하는 브릴루앙 이득 신호(2001)와 로컬 비트 스펙트럼(local beat spectrim)(2002)의 컨벌루션(convolution)으로 인하여, 실제로 시험 광섬유에서 검출되는 브릴루앙 이득 신호(2003)는 도시되는 것과 같이 잡음을 포함하는 넓은 선폭을 갖는다.
- [0037] 도 2b를 참조하면, 펌프광신호를 소정의 주파수( $\Omega$ )에 따라 변조하여, 기존 펌프광신호 주파수( $\nu_0$ ) 성분을 제거하거나 무시할 수 있을 정도로 작게 하고, 기존 펌프광신호 주파수( $\nu_0$ )에서 상기 주파수( $\Omega$ )만큼 크거나 작은 첫 번째 측대역(sideband) 성분만 남게할 수 있다. 그 결과, 브릴루앙 이득 신호(2011)는 도시되는 것과 같은 형태가 된다. 예컨대, 주파수( $\Omega$ )가 5 Mhz이면 브릴루앙 이득 신호(2011)는 도 2a의 브릴루앙 이득 신호(2001)에서 양쪽으로 피크가 5 Mhz씩 이동한 형태를 갖는다. 또한, 브릴루앙 이득 신호(2011)와 로컬 비트 스펙트럼(2012)과의 컨벌루션 결과, 실제로 시험 광섬유에서 검출되는 브릴루앙 이득 신호(2013)는 도시되는 것과 같은 형태가 된다.
- [0038] 도 2c를 참조하면, 본 발명의 실시예들에서는, 주파수가 변조된 펌프광신호를 이용하여 얻어지는 브릴루앙 이득

신호(2013)와 주파수가 변조되지 않은 펄스광신호를 이용하여 얻어지는 브릴루앙 이득 신호(2003)의 차이를 이용하여 잡음을 포함하지 않는 순수한 브릴루앙 이득에 대응되는 신호(2023)를 얻을 수 있다. 즉, 신호(2013)와 신호(2003)의 차이로 얻어지는 신호(2023)를 최종 신호로 할 수 있다. 최종 신호(2023)의 선폭은 펄스광신호를 변조하는 주파수( $\Omega$ )에 따라 결정될 수 있다. 예컨대, 주파수( $\Omega$ )가 1MHz라면 펄스광신호는 기존 피크에서 양쪽으로 각각 1MHz씩 천이한 위치에 피크를 가지므로, 이로부터 생성된 브릴루앙 이득 신호(2023)의 선폭은 대략 2MHz가 된다.

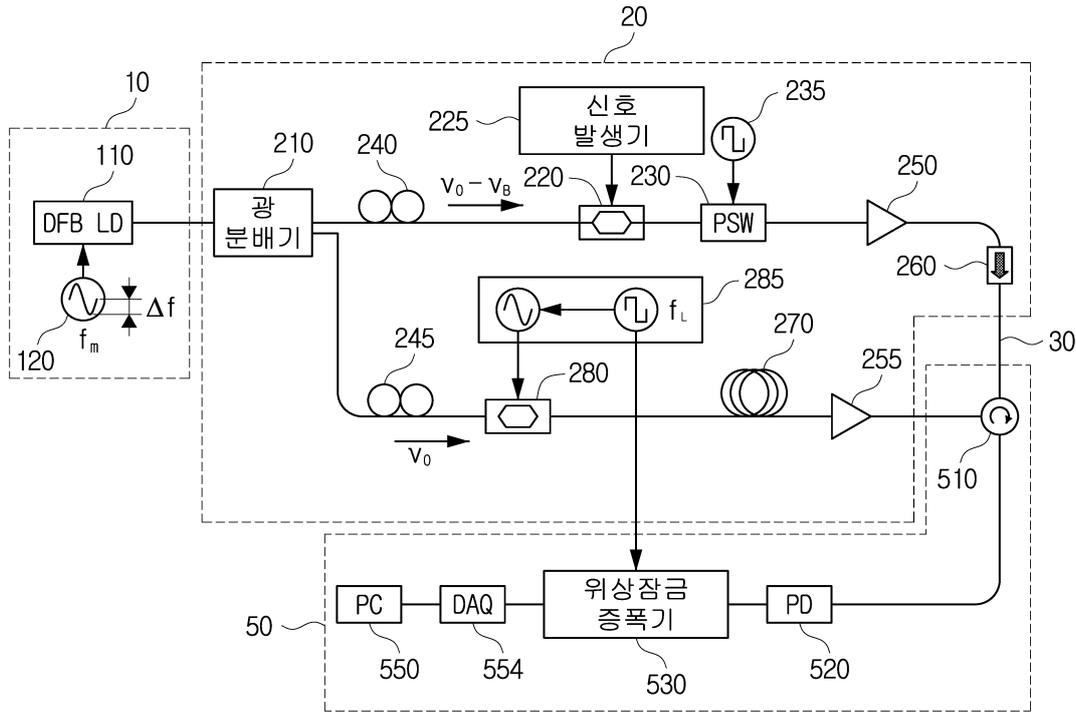
- [0039] 도 2c에서 최종 신호(2023)는 브릴루앙 신호의 크기를 나타내기 위하여 출력 신호의 절대값으로 표시되었으나, 이는 예시적인 것으로서 신호의 출력값은 위상잠금 증폭기의 설정 등에 따라 도시된 것과 상이할 수 있다.
- [0040] 이상의 원리를 이용한 실시예들에 따른 분포형 광섬유 센서가 이하에서 도 3a 내지 3c를 참조하여 더 설명된다. 설명의 편의를 위하여, 도 1에 도시된 실시예에 따른 분포형 광섬유 센서를 참조하여 분포형 광섬유 센서의 동작에 대하여 설명한다.
- [0041] 도 3a는 종래의 분포형 광섬유 센서에서 위상잠금(lock-in) 신호를 얻기 위하여 사용된 초핑(chopping) 신호의 파형을 나타내는 그래프이다. 도 3a를 참조하면, 종래에는 광원의 제2 광신호(즉, 펄스광신호)를 소정의 주파수( $f_L$ )를 갖는 구형파 초핑 신호(3001)에 따라 초핑한다. 즉, 제2 광신호는 초핑 신호에 따라 온/오프 방식으로 세기가 변조되었다. 상기 초핑 신호의 주파수를 위상잠금 증폭기의 기준 주파수로 이용하여 브릴루앙 이득 신호를 검출하였다.
- [0042] 도 3b는 일 실시예에 따른 분포형 광섬유 센서에서 사용되는 진폭편이변조(Amplitude Shift Keying Modulation)를 위한 변조 신호(3002)의 파형을 나타내는 그래프이다. 본 실시예에 따른 변조 신호(3002)는, 제1 주파수( $f_L$ )에 따라 제1 구간(3021) 및 제2 구간(3022)으로 나누어 질 수 있으며, 제1 구간(3021)은 특정한 정현파로 변조되어 지며 제2 구간(3022)은 변조가 안 이루어 진다. 즉, 제1 구간(3021)이 반복되는 주기(T)는  $1/f_L$ 일 수 있다. 변조 신호(3002)의 제2 구간(3022)은 일정한 세기를 갖는 신호일 수 있다.
- [0043] 변조 신호(3002)를 생성하기 위해, 광변조부(20)는 신호발생기(285)를 포함할 수 있다. 신호발생기(285)는 제1 주파수를 갖는 기준 신호를 제공할 수 있다. 예를 들어, 신호발생기(285)에 의하여 제공되는 기준 신호는 도 3a에 도시된 초핑 신호(3001)와 동일 또는 유사한 파형을 갖는 구형파 신호일 수 있다. 또한 신호발생기(285)는, 제2 주파수를 갖는 정현파 신호를 제1 주파수의 기준 신호에 따라 진폭편이변조(Amplitude Shift Keying Modulation)하여 변조 신호(3002)를 생성할 수 있다. 이때, 제2 주파수는 제1 주파수보다 클 수 있다.
- [0044] 신호발생기(285)는, 생성된 변조 신호(3002)를 광변조기(280)에 전달할 수 있다. 광변조기(280)는, 광원부(10)로부터 수신된 제2 광신호를 변조 신호(3002)에 따라 위상 변조하여 시험 광섬유(30)에 인가할 수 있다. 그러나, 광변조기(280)에 의한 변조 방식은 위상 변조에 한정되는 것은 아니며, 예컨대 다른 실시예에서 광변조기(280)는 세기 변조기(intensity modulator)로 구성될 수도 있다.
- [0045] 신호발생기(285)에 의해 생성된, 제1 주파수를 갖는 기준 신호는 광검출부(50)의 위상잠금 증폭기(530)에도 전달될 수 있다. 위상잠금 증폭기(530)는 제1 주파수에 위상잠금된 브릴루앙 산란광을 검출할 수 있다. 즉, 위상잠금 증폭기(530)는 제1 주파수를 기준 주파수로 하여 브릴루앙 산란광을 단속하여 검출함으로써 브릴루앙 이득 신호를 검출할 수 있다.
- [0046] 도 3c는 일 실시예에 따른 분포형 광섬유 센서의 광검출부에서 도 3b의 변조 신호를 이용하여 얻어지는 출력 신호를 나타낸 그래프이다. 도 3b를 참조하여 전술한 것과 같이, 제2 광신호를 변조하기 위한 변조 신호(3002)는 제2 주파수로 변조된 제1 구간(3021) 및 일정한 세기를 갖는 제2 구간(3022)을 포함한다. 그 결과, 제2 광신호를 펄스광신호로 하여 생성되는 브릴루앙 이득 신호는, 도 3c에 도시된 것과 같이 제1 브릴루앙 이득 신호(3031) 및 제2 브릴루앙 이득 신호(3032)를 포함할 수 있다. 제1 브릴루앙 이득 신호(3031)는 제1 구간(3021)에 의해 변조된 제2 광신호로부터 생성되는 신호이며, 제2 브릴루앙 이득 신호(3032)는 제2 구간(3022)에 의해 변조된 제2 광신호로부터 생성되는 신호이다.
- [0047] 위상잠금 증폭기(530)는, 제1 브릴루앙 이득 신호(3031)와 제2 브릴루앙 이득 신호(3032)의 차이를 이용하여, 잡음을 제거 및/또는 감소시키고 순수한 브릴루앙 이득에만 대응되는 최종 브릴루앙 이득 신호(3033)를 검출할 수 있다. 예컨대, 위상잠금 증폭기(530)는 제1 브릴루앙 이득 신호(3031)와 제2 브릴루앙 이득 신호(3032)의 차이에 해당하는 신호를 최종 신호(3033)로 출력할 수 있다. 이때 신호(3033)의 선폭은 제2 주파수를 바꿈으로써 변화시킬 수 있다. 예를 들어 제2 주파수가 1MHz라면 변조 신호의 제1 구간에 의해 변조된 제2 광신호는 기준

피크에서 양쪽으로 각각 1MHz씩 천이한 위치에 피크를 가지므로, 이로부터 생성된 최종 브릴루앙 이득 신호 (3023)의 선폭은 대략 2MHz가 된다.

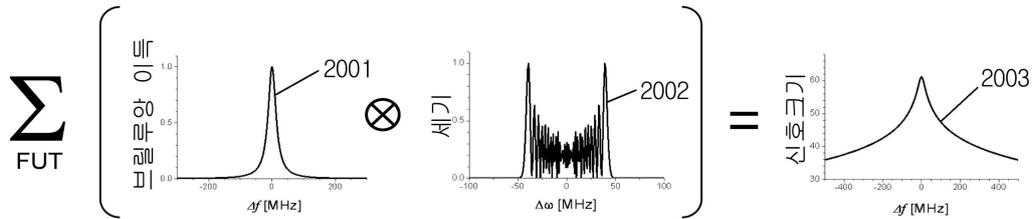
- [0048] 도 4는 시험 광섬유의 예시적인 구성을 나타내는 개략도이다.
- [0049] 도 4를 참조하면, 시험 광섬유(30)는 약 50m 길이의 단일 모드 광섬유(Single Mode Fiber; SMF)에 총 8 구간의 분산 편이 광섬유(Dispersion Shifted Fiber; DSF)를 각각 약 15cm, 약 12cm, 약 10cm, 약 5cm, 약 3cm, 약 2.5cm, 약 2cm 및 약 1cm의 길이로 용착 접속하여 구성되었다. 8개의 DSF는 광교립기(260)의 위치를 원점으로 하여 각각 약 8.0m, 약 9.1m, 약 10.2m, 약 11.3m, 약 12.3m, 약 13.1m, 약 14.1m 및 약 15.1m의 위치에 DSF의 중앙이 위치하도록 배치되었다. 이때, 광원부의 변조 주파수( $f_m$ )는 약 1.9MHz이며 변조 신호의 크기  $\Delta f$ 는 약 4GHz이었다. 시험 광섬유(30)의 측정 구간의 총 길이는 약 50m이며 공간 분해능은 10cm로 설정되었다.
- [0050] 그러나 전술한 시험 광섬유의 구성은 단지 예시적인 것으로서, 다른 실시예에서 시험 광섬유는 다른 상이한 구성을 가질 수도 있다.
- [0051] 도 5a 내지 5d는 도 4에 도시된 시험 광섬유를 이용하여 종래의 분포형 광섬유 센서로부터 출력되는 브릴루앙 이득 스펙트럼을 나타내는 그래프들이다.
- [0052] 도 5a는 주파수 오프셋 및 위치에 따른 브릴루앙 이득 스펙트럼을 나타낸다. 도 5b는 약 9m 위치(약 12cm 길이의 DSF)에서의 브릴루앙 이득 스펙트럼의 신호 및 잡음을 나타내고, 도 5c는 약 8m 위치(약 15cm 길이의 DSF)에서의 브릴루앙 이득 스펙트럼의 신호 및 잡음을 나타낸다. 또한, 도 5d는 위치에 따른 주파수 오프셋을 나타낸다. 도시되는 바와 같이, 종래의 분포형 광섬유 센서에서는 시험 광섬유 내의 DSF 길이가 약 15cm일때는 잡음이 신호보다 작아 측정이 가능하나, DSF 길이가 약 12cm일때는 잡음이 신호보다 커 측정이 어려워지는 것을 확인할 수 있다.
- [0053] 한편, 도 6a 내지 6d는 도 4에 도시된 시험 광섬유를 이용하여 일 실시예에 따른 분포형 광섬유 센서로부터 출력되는 브릴루앙 이득 스펙트럼을 나타내는 그래프들이다.
- [0054] 도 6a는 주파수 오프셋 및 위치에 따른 브릴루앙 이득 스펙트럼을 나타낸다. 도 6b는 약 9.1m 위치(약 12cm 길이의 DSF)에서의 브릴루앙 이득 스펙트럼의 신호 및 잡음을 나타내고, 도 6c는 약 14m 위치(약 2cm 길이의 DSF)에서의 브릴루앙 이득 스펙트럼의 신호 및 잡음을 나타낸다. 또한, 도 6d는 위치에 따른 주파수 오프셋을 나타낸다. 도시되는 바와 같이, 펄프광신호의 변조 방식의 변화로 인하여 약 2cm 길이의 DSF까지도 측정이 가능한 것을 확인할 수 있다.
- [0055] 전술한 실시예들에 따른 분포형 광섬유 센서 및 이의 공간 분해능 향상 방법에 의하면, 브릴루앙 광학적 공간영역 해석(Brillouin Optical Correlation Domain Analysis) 방식을 이용하여 대형 건축물, 교량, 항공기, 열차 등의 물리적인 변형 및 온도를 측정할 수 있다. 또한, 브릴루앙 산란광을 검출하기 위한 위상잠금 신호에 추가적인 위상 변조를 수행함으로써, 좁은 선폭의 브릴루앙 이득 스펙트럼을 얻을 수 있어 공간 분해능을 향상시킬 수 있는 이점이 있다.
- [0056] 이상에서 살펴본 본 발명은 도면에 도시된 실시예들을 참고로 하여 설명하였으나 이는 예시적인 것에 불과하며 당해 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 이로부터 다양한 변형 및 실시예의 변형이 가능하다는 점을 이해할 것이다. 그러나, 이와 같은 변형은 본 발명의 기술적 보호범위 내에 있다고 보아야 한다. 따라서, 본 발명의 진정한 기술적 보호범위는 첨부된 특허청구범위의 기술적 사상에 의해서 정해져야 할 것이다.

도면

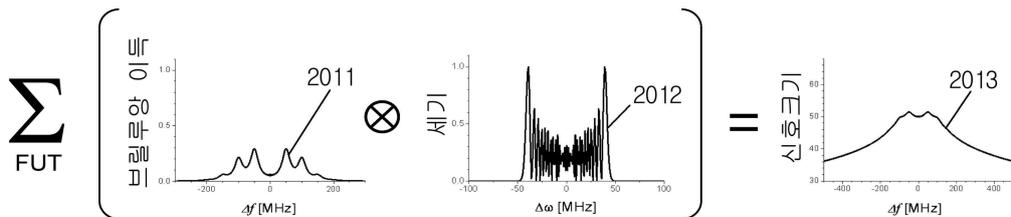
도면1



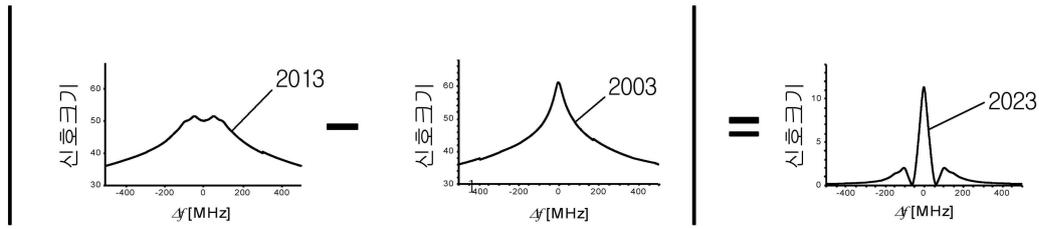
도면2a



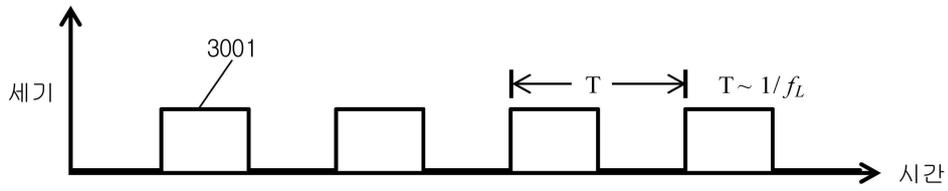
도면2b



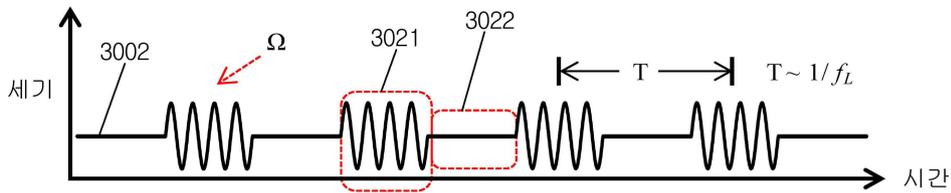
도면2c



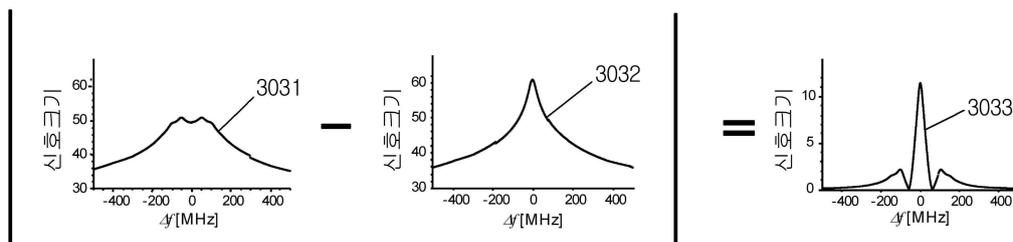
도면3a



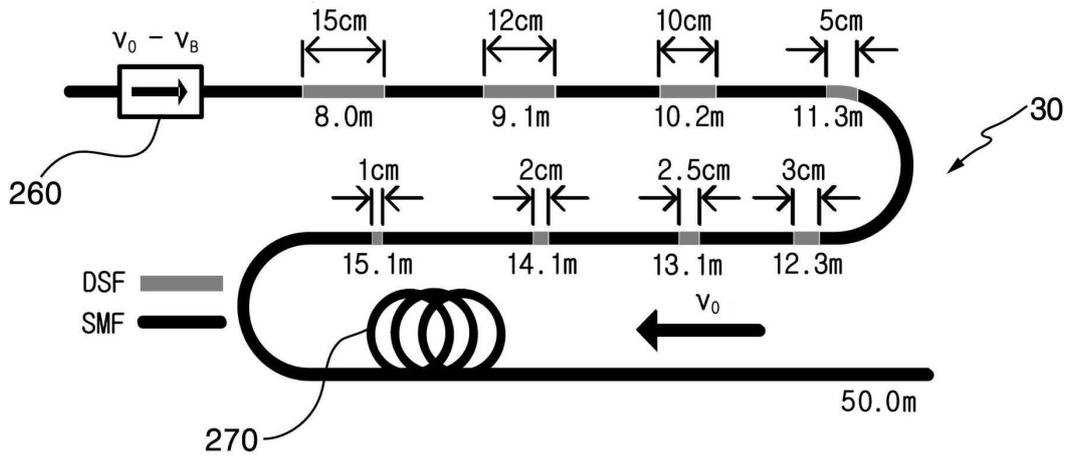
도면3b



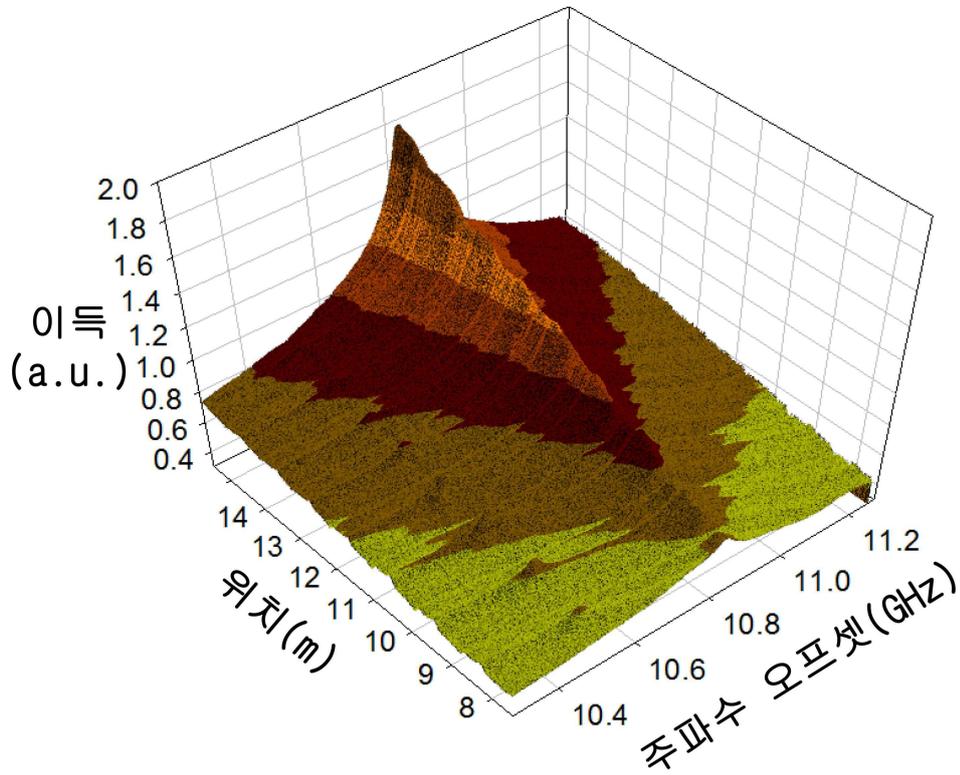
도면3c



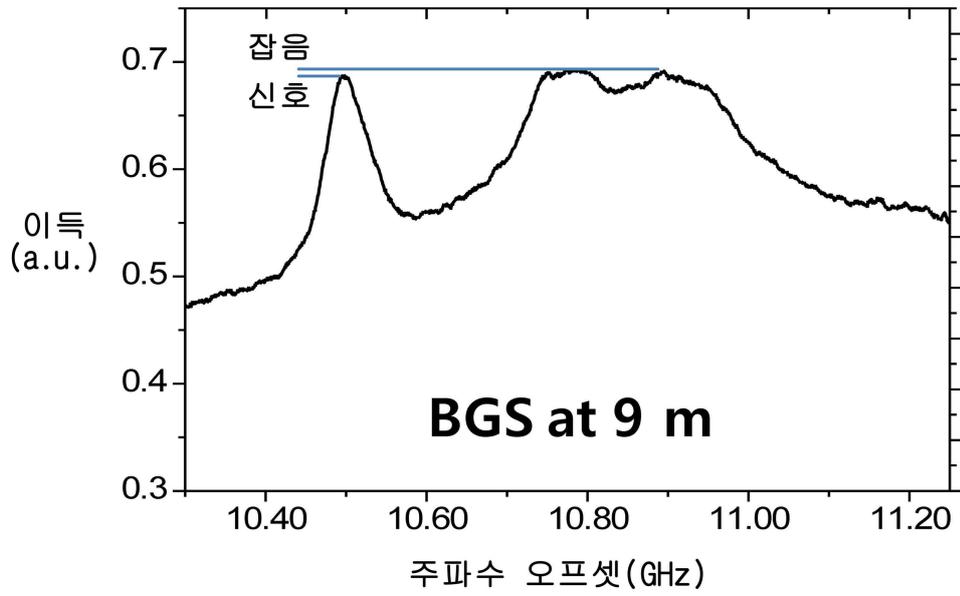
도면4



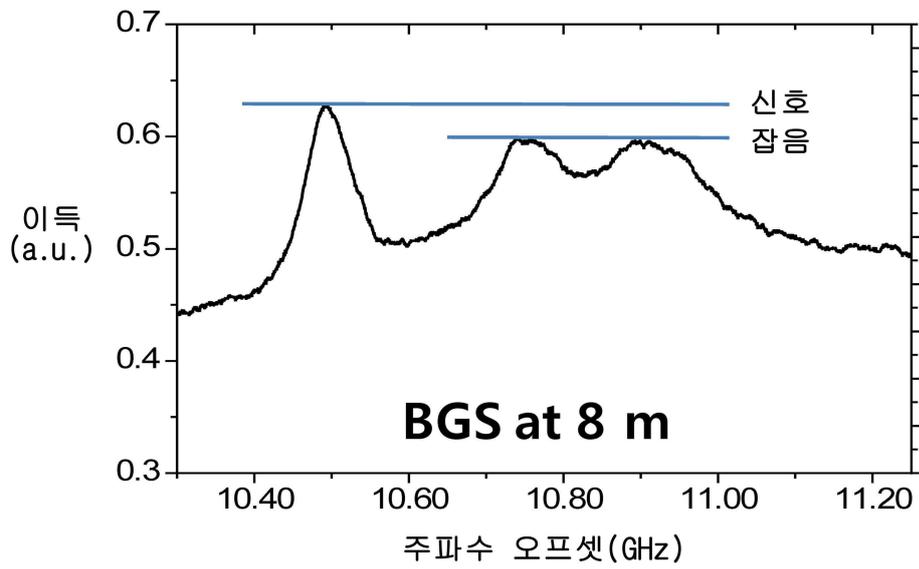
도면5a



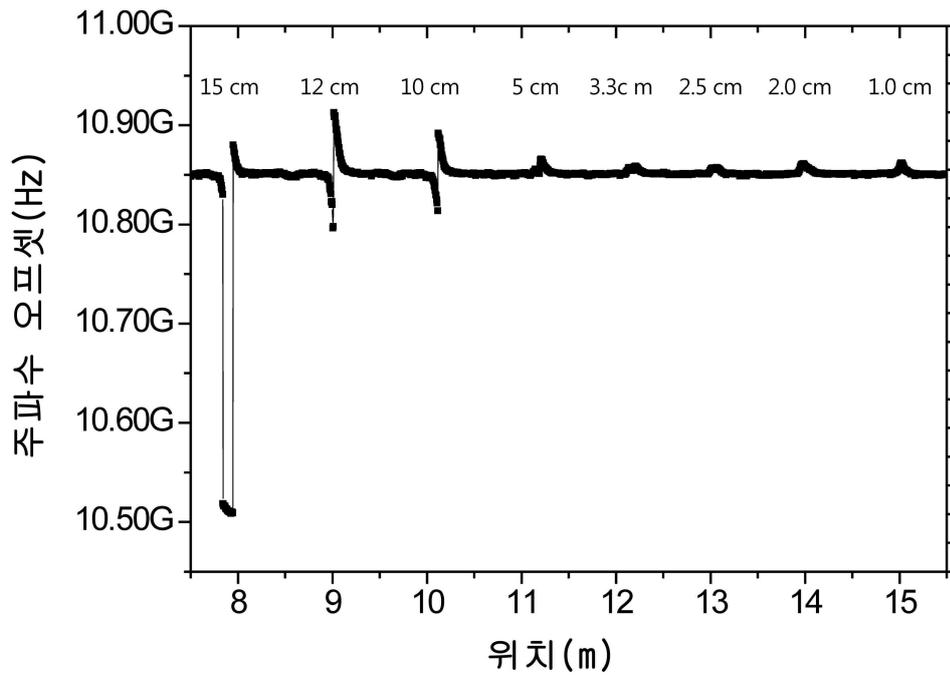
도면5b



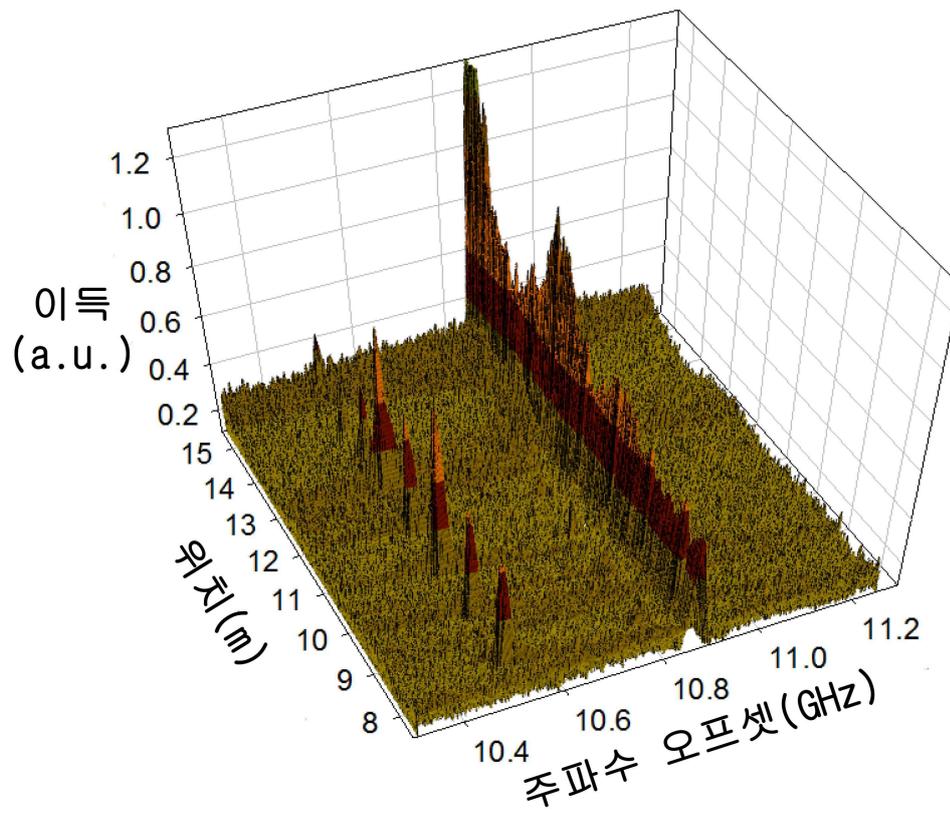
도면5c



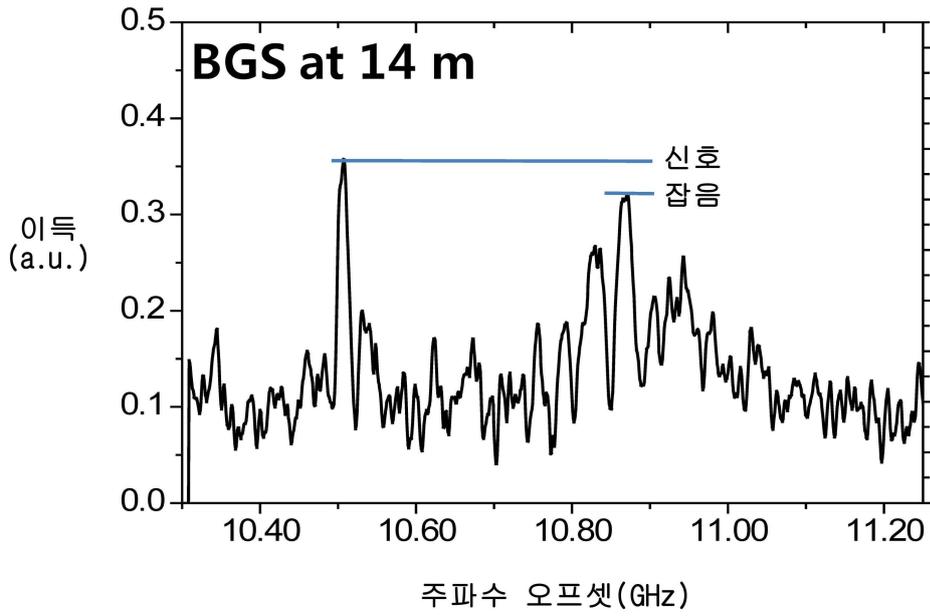
도면5d



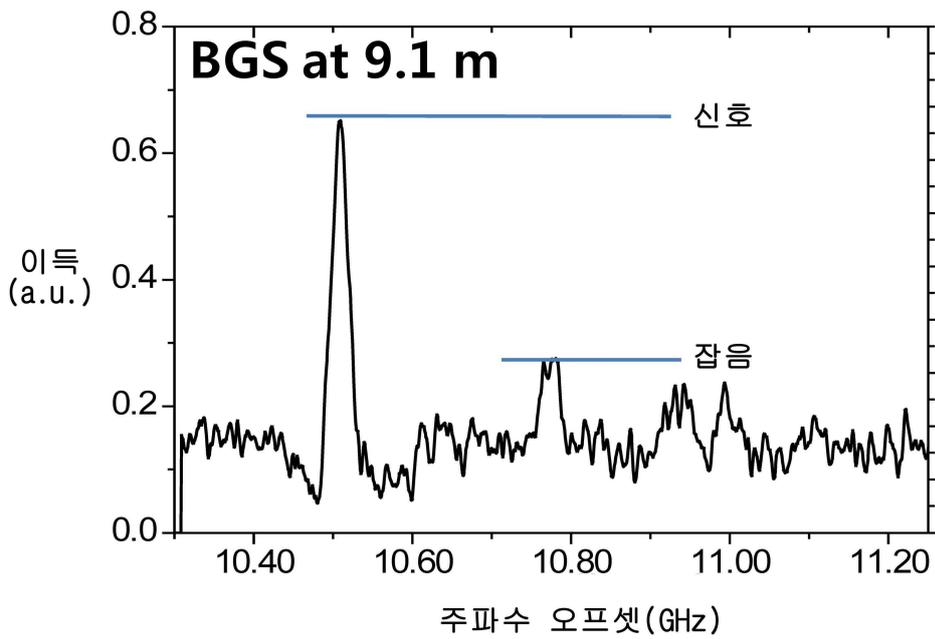
도면6a



도면6b



도면6c



도면6d

