

공간 선택적 브릴루앙 산란을 이용한 분포형 광섬유 센서의 실험

서민성 · 윤승철 · 현진영 · 박희갑[†]

전북대학교 물리학과

☎ 561-756 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14

(2006년 2월 23일 받음, 2006년 6월 23일 수정본 받음)

직접 광주파수 변조된 레이저 다이오드를 광원으로 이용하여 공간 선택적 브릴루앙 산란 방식으로 분포형 광섬유 센서를 구성하여 실험하였다. 광주파수가 정현파로 변조된 펌프와 프로브 빛이 광섬유 내로 서로 반대 방향으로 진행하며 중첩되도록 함으로써 광섬유 내 특정 지점에서만 유도 브릴루앙 산란이 발생하도록 하였으며, 변조 주파수를 변화시켜 브릴루앙 이득 피크의 위치를 조절할 수 있었다. 브릴루앙 천이 주파수가 서로 다른 광섬유를 접속한 경우와 광섬유 길이를 따라 온도 분포가 존재하는 경우에 대해 각각 브릴루앙 천이 주파수의 분포를 측정하였다. 브릴루앙 천이 주파수의 온도 변화율은 $1.33 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$ 로 측정되었다.

주제어 : Optical fiber, Fiber sensor, Distributed sensor, Brillouin scattering, Optical frequency modulation.

I 서 론

광섬유는 외부 환경 변화에 대해 고유 특성의 변화가 민감하므로 여러 가지 물리 변수에 대한 센서로서 활용될 수 있다. 한편, 그 특성상 긴 길이를 이용하여 구조물 내부에 밀도 있게 포설하는 것이 가능하므로 분포형 계측에 유리한 장점을 가지고 있다.^[1] 광섬유를 이용하는 분포형 계측의 한 가지 방법으로서 광섬유 내 비선형 광학 현상의 하나인 브릴루앙 산란(Brillouin scattering)을 이용하는 방법이 있다.^[2] 브릴루앙 산란에 의해 광원의 빛은 브릴루앙 천이 주파수에 해당하는 주파수 이동을 겪는다. 이러한 브릴루앙 천이 주파수는 광섬유의 물성과 구조에 의해 달라지며^[3], 광섬유 주위의 온도나 스트레인에 따라 선형적으로 변한다.^[4,5] 따라서, 브릴루앙 천이 주파수의 변화를 측정하면 광섬유를 따라 분포하는 온도나 스트레인과 같은 물리 변수의 변화를 측정할 수 있다.^[4-6]

브릴루앙 산란을 이용하는 분포형 광섬유 센서 시스템 방식은 펌프 광원의 형태에 따라 BOTDR (Brillouin optical time domain reflectometry) 방식^[7], BOTDA (Brillouin optical time domain analysis) 방식^[8,9]과 BOCDA (Brillouin optical correlation domain analysis)^[10-14] 방식 등이 있다. BOTDR 방식과 BOTDA 방식은 펄스 형태의 광원을 이용하여 브릴루앙 산란된 빛을 시간 영역에서 관찰하는 방식으로 장거리 계측에 용이하다는 장점을 지니고 있지만,^[15] 이로 인해 공간 분해능이 펌프 광원의 펄스폭에 의해 제한되는 단점도 지니고 있다.^[16] 이러한 펄스 광원 방식의 단점은 직접 광주파수 변조된 연속발진 광원을 이용하여 시험 광섬유의 특정 지점에서만 브릴루앙 산란이 발생하도록 제어함으로써 해결할 수 있다.^[10,17] 이러한 방식을 공간 선택적 브릴루앙 산란이라

하며, BOCDA는 이러한 공간 선택적 브릴루앙 산란을 이용하는 방식 중의 하나이다. 이때 시스템의 공간 분해능은 서로 교차된 펌프와 프로브의 광주파수 기울기(시간 변화율)에 의해 결정되므로 이를 조절하여 공간 분해능을 개선하는 것이 가능하다.^[11]

본 논문에서는 공간 선택적 브릴루앙 산란 방식으로 분포형 광섬유 센서를 구성하여 실험하였다. 주입 전류 변조로써 직접 광주파수 변조된 연속발진 형태의 레이저 다이오드(LD : laser diode)를 광원으로 사용하였다. 광주파수가 변조된 펌프와 프로브 빛이 시험 광섬유 내에서 서로 반대 방향으로 진행하여 중첩되도록 함으로써 광섬유 내 특정 지점에서만 유도 브릴루앙 산란이 발생할 수 있도록 하였다. 브릴루앙 천이 주파수가 서로 다른 두 종류의 광섬유가 접속된 경우와 광섬유 길이를 따라 온도 분포가 존재하는 경우에 대하여 각각 브릴루앙 천이 주파수의 분포를 측정함으로써 분포형 센서로서의 기능을 확인하였다.

II. 동작 원리 및 이론

공간 선택적 브릴루앙 산란 방식의 기본 개념도는 그림 1과 같다. 주입 전류를 정현파로 변조함으로써 직접 광주파수 변조된 LD를 광원으로 이용한다. 변조 주파수 f_m 의 정현파로 광주파수 변조된 LD의 빛을 둘로 갈라 하나를 펌프(pump)로 사용하고, 다른 하나를 고속 외부 변조(10~11 GHz)를 가하여 이때 발생하는 하향 이동된 sideband를 프로브(probe)로 사용한다. 그 다음 펌프와 프로브 빛을 서로 반대 방향으로 광섬유에 입사시켜 진행시킨다. 그러면 광섬유 내 특정 위치에서 펌프와 프로브 빛의 광주파수 차이가 시간에 무관하게 브릴루앙 천이 주파수와 일치하게 되며, 그 지

[†] E-mail: hgpark@chonbuk.ac.kr

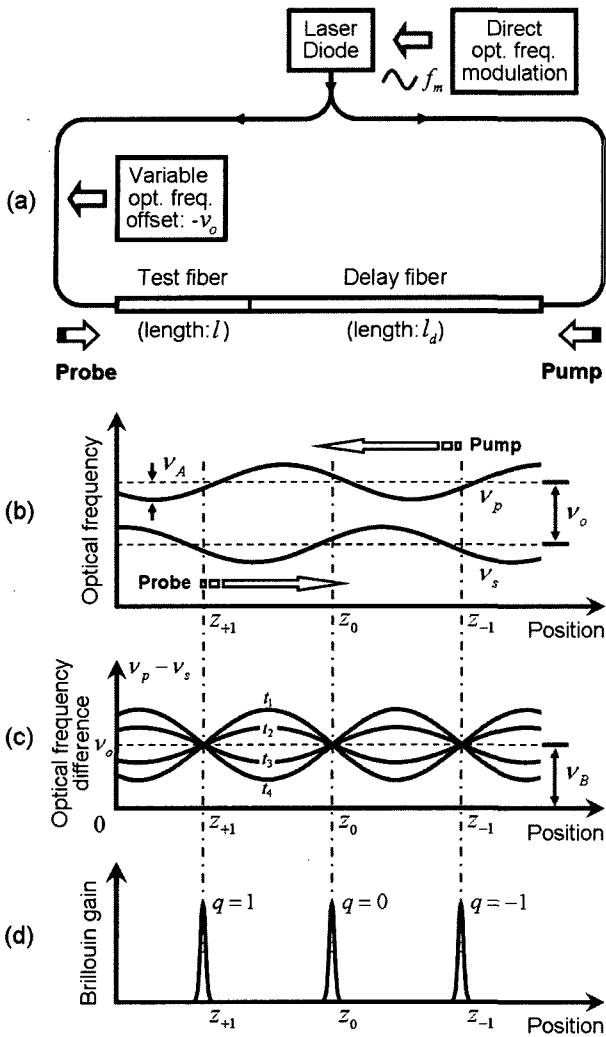


그림 1. 정현파로 광주파수 변조된 광원을 이용하는 공간 선택적 브릴루앙 산란 방식의 기본 개념도.
 (a) 공간 선택적 브릴루앙 산란 방식의 기본 구성
 (b) 펌프와 프로브의 광주파수 변조 파형
 (c) 펌프와 프로브 간 광주파수 차이의 시간의 따른 변화 ($t_1 < t_2 < t_3 < t_4$)
 (d) 공간 선택적 브릴루앙 산란에 의한 브릴루앙 이득 피크의 분포

점에서만 브릴루앙 산란에 의한 프로브의 광증폭이 일어나게 된다. 그 원리를 이론적으로 간단히 기술하면 다음과 같다.

그림 1과 같이 프로브 빛이 길이 l 의 시험 광섬유에 입사되고, 펌프 빛은 길이 l_d 의 지연 광섬유를 지나 시험 광섬유에 입사될 때, 프로브 빛의 광주파수 ν_s 와 펌프 빛의 광주파수 ν_p 를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\nu_s(z, t) = \nu_A \cos \left[2\pi f_m \left(t - \frac{n}{c} z \right) \right] - \nu_o \quad (1)$$

$$\nu_p(z, t) = \nu_A \cos \left[2\pi f_m \left(t + \frac{n}{c} (z - (l + l_d)) \right) \right] \quad (2)$$

위의 식에서 z 는 프로브 빛이 시험 광섬유에 입사되는 지점을 기준으로 한 광섬유 상의 위치, ν_A 는 광주파수의 변조 진폭, n 은 광섬유의 굴절률, c 는 진공에서의 빛의 속도, 그리고 ν_o 는 펌프와 프로브 변조파들 사이의 광주파수 offset을 나타낸다.

서로 반대 방향으로 진행하는 펌프 빛과 프로브 빛이 서로 중첩되면, 두 빛의 광주파수 차이가 광섬유의 브릴루앙 천이 주파수와 일치하는지의 여부에 따라 유도 브릴루앙 산란이 광섬유 내에서 일어난다. 이때 펌프와 프로브 빛의 광주파수 차이는 식(1)과 (2)를 이용하면 다음과 같이 표현된다.

$$\nu_p - \nu_s = \nu_o + 2\nu_A \sin \left[2\pi f_m \frac{n}{c} \left(z - \frac{l + l_d}{2} \right) \right] \sin \left[2\pi f_m \left(\frac{n}{c} \frac{l + l_d}{2} - t \right) \right] \quad (3)$$

위의 식(3)을 보면, 펌프와 프로브 빛 간의 광주파수 차이가 공간(z)에 관한 sine 항과 시간(t)에 관한 sine 항의 곱으로 표현됨을 알 수 있다. 식(3)에서 공간에 관한 sine 항이 0이 되는 위치가 존재하는데, 즉,

$$z_q = \frac{1}{2}(l + l_d) - \frac{1}{2f_m} \frac{c}{n} \cdot q \quad (4)$$

의 지점에서는 시간의 변화에 관계없이 펌프와 프로브 간의 광주파수 차이는 항상 ν_o 로 고정된다. (q 는 정수) 이러한 현상을 그림 1(c)에서 확인할 수 있다. 만일 두 변조파 간의 광주파수 offset ν_o 가 브릴루앙 천이 주파수 ν_B 와 일치하는 경우, 식(4)로 주어지는 위치에서는 시간에 관계없이 브릴루앙 이득이 항상 최대가 된다. 결과적으로 그림 1(d)와 같이 광섬유 내 공간 영역에서 주기적인 브릴루앙 이득 피크 분포가 만들어진다. 한편, 식(4)에서 볼 수 있듯이, 변조 주파수 f_m 을 조절하면 이득 피크의 위치를 조절할 수 있다. 단, $q=0$ 인 경우에는 f_m 에 관계없이 이득 피크의 위치가 고정되므로 위치 조절이 불가능하다. 지연 광섬유가 없는 경우에는 위치 조절이 불가능한 차수 $q=0$ 의 피크가 시험 광섬유의 중앙에 항상 위치하게 된다. 따라서 적절한 길이의 지연 광섬유를 사용함으로써 피크의 위치 조절이 가능한 차수 $q \neq 0$ 의 피크가 시험 광섬유 내에 존재하도록 할 수 있다.

이상과 같은 공간 선택적 브릴루앙 산란의 원리를 이용하여 실제로 분포형 계측을 하려면, 우선 지연 광섬유 길이 l_d 와 변조 주파수 f_m 을 적절히 선택하여 시험 광섬유 내에 단 하나의 브릴루앙 피크만이 존재하도록 만든다. 그리고 변조 주파수 f_m 을 미세하게 조절하여 브릴루앙 이득 피크의 위치를 변화시킨다. 각각의 계측 지점(이득 피크 지점)에 대해 광주파수 offset ν_o 를 변화시키면서 브릴루앙 이득에 의해 증폭된 프로브 출력 파워의 변화를 측정하면 광섬유 상의 위치에 따른 브릴루앙 천이 주파수의 분포 변화를 알 수 있다.

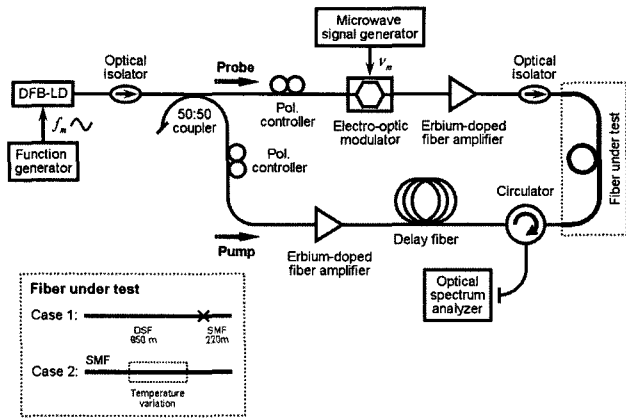


그림 2. 공간 선택적 브릴루앙 산란을 이용한 분포형 광섬유 센서의 실험 구성도

III. 실험 방법

그림 2는 공간 선택적 브릴루앙 산란을 이용한 분포형 광섬유 센서 시스템의 실험 구성도를 나타낸다. 광원으로 중심 파장이 1556 nm인 DFB-LD를 사용하였다. LD의 광주파수를 정현파로 변조하기 위해 함수 발생기를 사용하여 LD의 주입 전류를 정현파로 직접 변조시켰다. 이때 주입 전류의 변조 진폭은 1 mA이며, 이는 약 0.6 GHz의 광주파수 변화량에 대응된다.

정현파로 광주파수 변조된 빛을 광파워 분배 비율이 50 : 50인 방향성 광섬유 결합기를 거쳐 둘로 나누는 후, 이를 펌프와 프로브로 이용하였다. 프로브 빛을 전기광학 변조기로 변조하여 펌프 빛과의 광주파수 차이가 브릴루앙 천이 주파수(대략 11 GHz) 근처가 되도록 하였다. 실험에 사용된 전기광학 변조기는 Mach-Zehnder 방식의 LiNbO₃ 도파로형 광세기 변조기(intensity modulator)이며, 대역폭은 10 GHz이다. 프로브 빛으로 사용되는 하향 주파수 이동된 sideband의 세기가 가장 커지도록 전기광학 변조기에 입사된 빛의 편광 상태와 전기광학 변조기의 DC 바이어스를 적절히 조절하였다. 이때 전기광학 변조기에 가해진 RF 신호의 세기는 13 dBm이며, DC 바이어스는 6.5 V였다. 전기광학 변조기를 거쳐 광주파수 이동된 프로브 빛을 Er-칩가 광섬유 증폭기(EDFA : erbium-doped fiber amplifier)로 증폭시킨 후 시험 광섬유에 입사시켰다. 시험 광섬유에 입사된 프로브의 파워는 400 μW이다.

충분히 큰 펌프 파워를 얻기 위해 펌프 빛을 그림 2의 하단에 위치한 EDFA를 이용해 증폭시킨 후, 지연 광섬유와 광 circulator를 거쳐 시험 광섬유의 끝단에 입사시켰다. 시험 광섬유에 입사된 펌프의 파워는 8.8 mW이다. 시험 광섬유에 입사된 펌프와 프로브 빛에 의해 유도 브릴루앙 산란이 효율적으로 발생하도록 편광 조절기를 이용하여 두 빛의 편광 상태를 일치시켰다.

분포형 계측을 시험하기 위해 두 가지 방식으로 시험 광섬

유를 구성하여 실험하였다. 첫 번째 실험에서는 브릴루앙 천이 주파수가 서로 다른 두 종류의 광섬유를 접속하여 시험 광섬유를 구성하였다. 시험 광섬유의 구성에 이용된 광섬유는 분산천이 광섬유(DSF : dispersion-shifted fiber)와 일반 단일모드 광섬유(SMF : single-mode fiber)이며, 프로브 빛의 입사점을 기준으로 DSF, SMF 순으로 구성하였다. 실험에 사용된 DSF와 SMF의 길이는 각각 950 m와 250 m이다. 별도의 예비 실험에서 DSF와 SMF의 브릴루앙 천이 주파수는 온도 24°C에서 각각 10.788 GHz, 10.836 GHz로 측정되었으며, 브릴루앙 이득 스펙트럼의 반치선폭은 각각 35 MHz, 29 MHz였다. 지연 광섬유의 길이는 2890 m로 하여, 첫 번째 차수($q=1$)의 브릴루앙 이득 피크가 시험 광섬유 내에 위치하도록 하였다. 함수 발생기의 변조 주파수 f_m 을 60 kHz에서 100 kHz 사이의 범위 내에서 조절하여 계측 지점을 설정한 후, 전기광학 변조기의 변조 주파수 ν_m 을 10.72 GHz부터 10.92 GHz까지 4 MHz 간격으로 변화시키면서 계측 지점에 따른 프로브 출력 파워를 광스펙트럼 분석기(OSA : optical spectrum analyzer)를 이용해 측정하여 브릴루앙 천이 주파수의 분포를 구하였다.

두 번째 온도 분포 계측 실험을 위해, 온도 챔버를 이용해 시험 광섬유의 일부 구간에 온도 분포 변화를 만들었다. 시험 광섬유는 앞 실험의 SMF와 같은 종류로서 총 길이는 440 m이며, 온도 챔버 내에 들어간 광섬유는 위치 120 m에서 340 m까지의 220 m 구간이다. 지연 광섬유의 길이는 2850 m로 하여, 첫 번째 차수($q=1$)의 브릴루앙 이득 피크가 시험 광섬유 내에 위치하도록 하였다. 시험 광섬유의 온도 분포 계측에 앞서 브릴루앙 이득 피크를 온도 챔버 내 구간인 223 m 지점에 위치시킨 후, 온도 챔버의 온도를 여러 단계로 변화시키면서 온도 변화에 대한 브릴루앙 천이 주파수의 변화율을 측정하였다. 다음으로 시험 광섬유의 위치에 따른 브릴루앙 천이 주파수의 분포를 측정 후 온도 분포와 비교하였다. 이때 챔버 외부의 기준 온도는 24°C이며, 온도 챔버 내의 온도는 50°C로 설정하였다. 변조 주파수 f_m 은 63 kHz에서 83 kHz 사이의 범위 내에서 조절하였으며, 전기광학 변조기 주파수 ν_m 은 10.76 GHz부터 10.936 GHz까지 4 MHz 간격으로 변화시키면서 프로브 출력의 변화를 측정하였다.

IV. 결과 및 토의

4.1 프로브의 생성과 브릴루앙 광증폭

프로브 빛의 생성을 위해 전기광학 변조기를 이용하여 광주파수 이동시킨 LD의 광스펙트럼을 OSA로 측정하여 그 결과를 그림 3에 나타내었다. 그림 3(a)는 광주파수 이동 전의 LD의 광스펙트럼을 나타낸다. 이때 LD 주입 전류의 변조 주파수 f_m 은 수십 kHz 정도이므로 광스펙트럼에는 그 영향이 나타나지 않는다. 그림 3(b)는 전기광학 변조기를 사용하여 변조 주파수 ν_m 을 10.836 GHz로 세기 변조하였을 때 광주파수 이동된 결과를 나타낸다. 변조 전의 중심 파장을

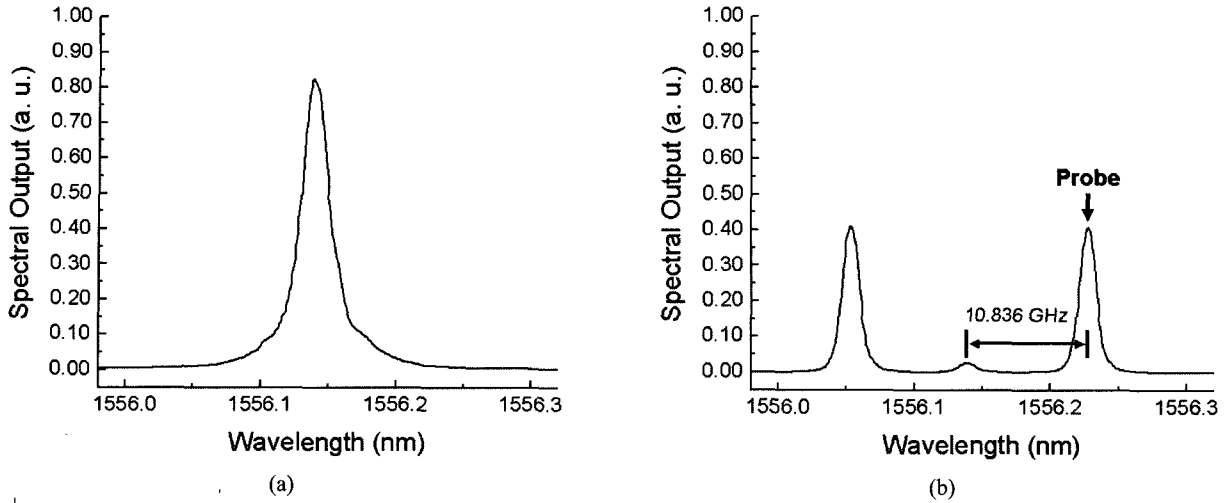


그림 3. 전기광학 변조기를 이용한 프로브 빛의 생성.
(a) 변조 전 광스펙트럼 (b) 변조 후 광스펙트럼

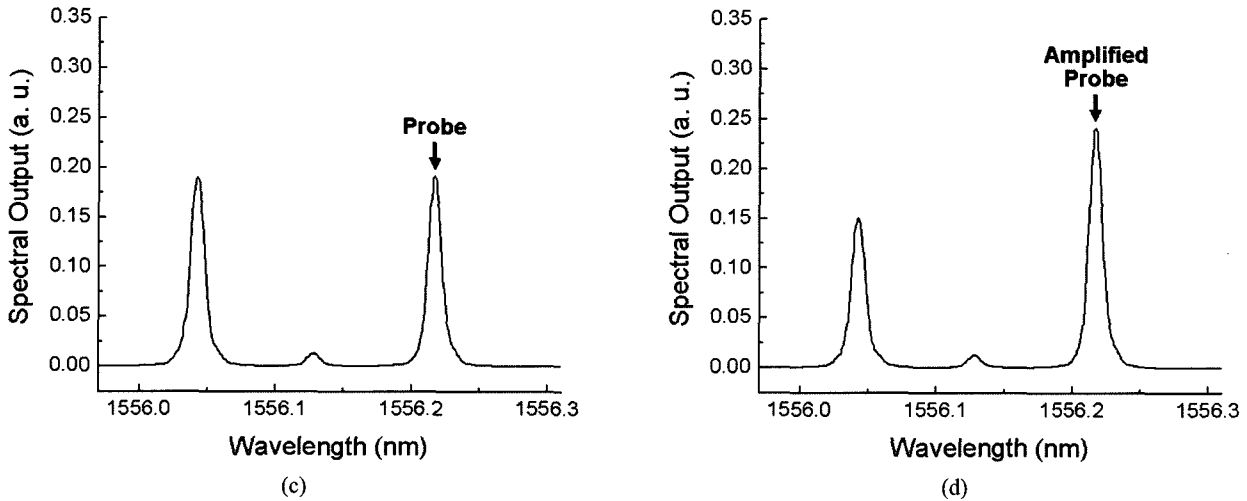


그림 4. 유도 브릴루앙 산란에 의한 프로브 빛의 증폭.
(a) 펌프 빛이 없을 때 (b) 펌프 빛이 있을 때

대칭으로 하여 양쪽에 sideband가 생성되었으며, 이때 광주파수가 88 pm(대략 10.9 GHz에 해당) 만큼 이동됨을 알 수 있었다. 프로브 빛으로 하향 주파수 이동된 장파장 쪽의 sideband를 이용하였으며, 이때 전기광학 변조기의 변조 주파수 ν_m 은 앞 절의 원리 설명에서의 펌프와 프로브 간의 광주파수 offset인 ν_o 와 같은 값이 된다.

다음으로 프로브 빛의 공간 선택적 브릴루앙 산란에 의한 브릴루앙 광증폭 여부를 알아보았다. 그림 4는 펌프 빛이 없을 때와 있을 때의 프로브 출력의 광증폭 결과를 OSA를 통해 측정된 결과이다. 이때 $\nu_m(=\nu_o)$ 을 10.836 GHz에, 그리고 f_m 을 100 kHz로 설정하여 첫 번째($q=1$) 브릴루앙 이득 피크를 SMF 상에 위치시키고 측정하였다. 그림 4(a)는 펌프 빛이 없을 때(펌프단의 EDFA 펌핑 전류 차단시)를 나타낸다. 프로브 빛은 증폭되지 않으므로 그림 3(b)와 변함없이 양 sideband의 크기는 거의 같다. 그러나 펌프 빛이 있을 때(펌

프단의 EDFA 펌핑시)는 그림 4(b)와 같이 단파장 쪽의 피크는 브릴루앙 손실에 의해 그 크기는 줄어들지만, 장파장 쪽의 피크, 즉, 프로브 출력은 공간 선택적 브릴루앙 산란에 의해 증폭됨을 볼 수 있다.

4.2 이중 광섬유의 접속

분포형 광섬유 센서로서의 적용성을 살펴보기 위해 먼저 시험 광섬유를 브릴루앙 천이 주파수가 서로 다른 DSF와 SMF의 접속으로 구성하여 그 특성을 살펴보았다. 브릴루앙 이득 피크의 위치에 따라 $\nu_m(=\nu_o)$ 을 변화시키면서 프로브 출력의 이득 변화를 측정된 결과는 그림 5와 같다. 그림 5(a)는 f_m 이 70 kHz로서 브릴루앙 이득 피크가 DSF 상의 562 m 지점에 위치할 때를 나타낸다. 이때 프로브의 출력 파워는 ν_m 이 10.789 GHz일 때 최대였으며, 이는 별도 실험에서 측정된 DSF의 브릴루앙 천이 주파수 10.788 GHz와 거의 일

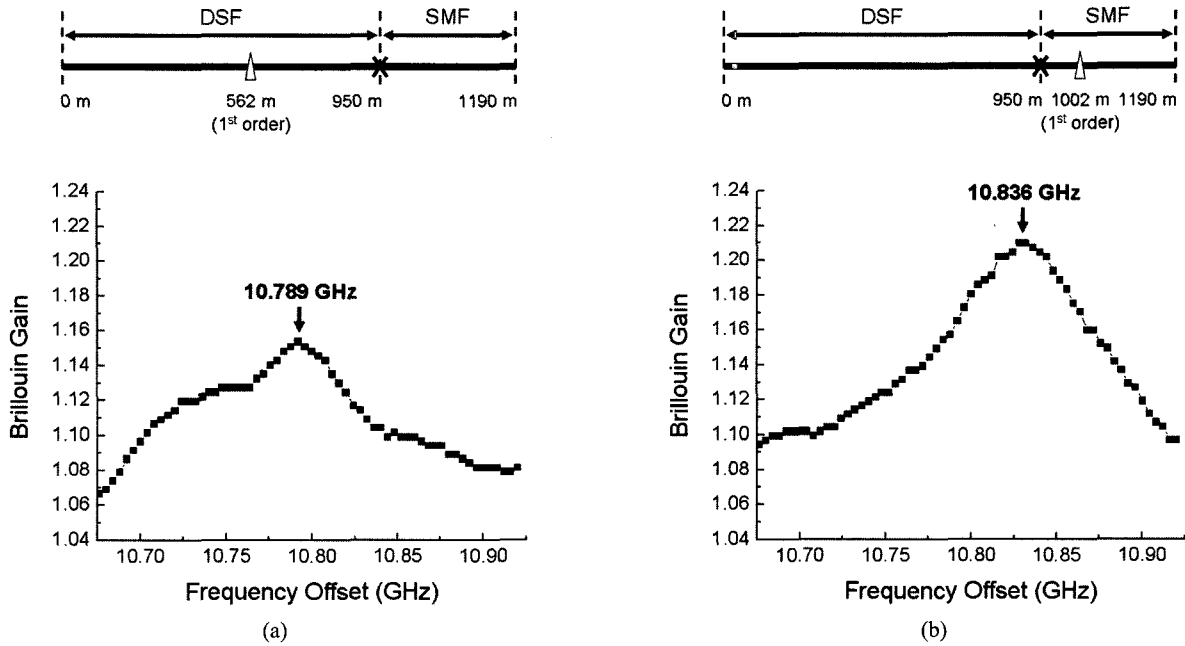


그림 5. 브릴루앙 이득 피크($q=1$)의 위치에 따른 프로브 출력 파워의 이득 변화.
 (a) 이득 피크가 분산천이 광섬유(DSF) 내에 위치하는 경우
 (b) 이득 피크가 단일모드 광섬유(SMF) 내에 위치하는 경우

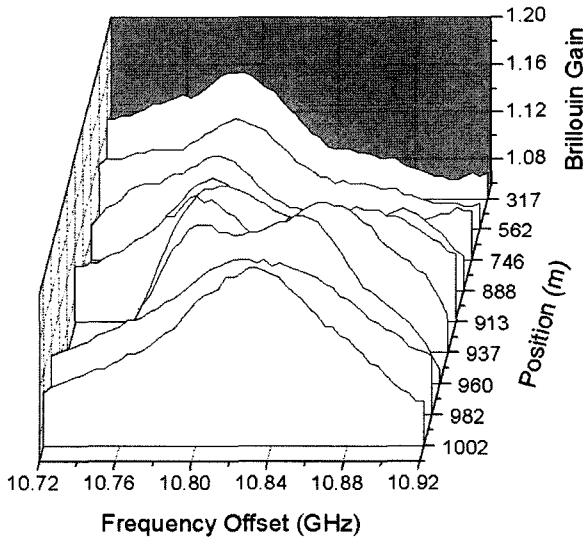


그림 6. 시험 광섬유가 이중 광섬유의 접속으로 이루어진 경우에 광 주파수 offset과 계측 지점(이득 피크 위치)에 따른 프로브 출력의 이득 분포.

치함을 알 수 있었다. 그림 5(b)는 첫 번째 브릴루앙 이득 피크가 SMF 상에 위치할 때의 결과를 나타낸다. 이때 f_m 이 100 kHz로서 브릴루앙 이득 피크의 위치는 SMF 영역의 1002 m 지점에 대응된다. 이 경우 브릴루앙 이득 피크가 SMF에 위치하므로, ν_m 이 SMF의 브릴루앙 천이 주파수와 일치하는 10.836 GHz에서 프로브의 브릴루앙 이득이 가장

크게 나타남을 알 수 있었다. 결과적으로 f_m 을 조절하여 브릴루앙 이득 피크의 위치를 조절할 수 있으며, ν_m 을 변화시키면서 프로브의 출력 파워를 측정하여 최대 피크 주파수를 구하면 브릴루앙 천이 주파수를 구할 수 있음을 볼 수 있다.

이중 광섬유의 접속으로 구성된 시험 광섬유 전체에 걸쳐 ν_m 에 따른 프로브 출력의 이득 분포의 변화를 측정한 결과는 그림 6과 같다. 프로브 빛의 브릴루앙 이득이 최대가 되는 피크 주파수는 시험 광섬유가 DSF와 SMF의 접속점인 950 m 지점을 두 영역으로 나누어짐을 알 수 있다. 프로브 출력 파워의 브릴루앙 이득이 최대가 되는 피크 주파수가 10.788 GHz에서 10.836 GHz로 이동함을 알 수 있었다. 접속점에서 멀리 떨어진 DSF 영역의 317 m 지점에서는 DSF의 브릴루앙 천이 주파수인 10.788 GHz에 뚜렷한 피크가 존재한다. 계측 지점이 이중 광섬유의 접속점으로 이동할수록 10.92 GHz 영역에서 작은 피크가 생겨난 후 크기가 점점 커지면서 SMF의 브릴루앙 천이 주파수인 10.836 GHz로 위치가 이동한다. 결과적으로 점점 근처에서는 크기가 약간 다른 두 개의 피크가 존재하게 된다. 계측 지점이 SMF 영역으로 넘어가면 DSF의 브릴루앙 천이 주파수 위치에 존재하던 피크는 점점 작아져 사라진다. 따라서 시험 광섬유의 950 m 지점을 전후로 브릴루앙 천이 주파수가 서로 다른 광섬유의 접속으로 시험 광섬유가 구성되어 있는 것을 확인할 수 있다.

4.3 온도 분포 계측

온도 분포에 대한 예측을 위해 우선 브릴루앙 천이 주파수의 온도에 대한 변화율을 측정하였다. 변조 주파수 f_m 을 조

절하여 브릴루앙 이득 피크 위치를 온도 챔버 내의 223 m 지점에 고정시킨 후 온도 변화에 따른 브릴루앙 이득 피크 주파수의 변화를 측정하여 그림 7에 나타내었다. 대략 10°C 간격으로 온도 변화를 설정하였는데, 온도 변화에 따라 브릴루앙 천이 주파수가 거의 선형적으로 변화하였다. 실험치를 직선으로 피팅한 결과 브릴루앙 천이 주파수의 온도 변화율은 1.33 MHz/°C로 측정되었다.

다음으로 시험 광섬유를 따라 온도 분포가 존재하는 경우에 대해 브릴루앙 천이 주파수의 분포를 측정하여 그 결과를 그림 8(a)에 나타내었다. 온도 챔버 외부의 온도는 24°C였으며, 챔버 내의 온도는 50°C로 설정하였다. 피크 주파수의 변화를 보다 쉽게 살펴볼 수 있도록 프로브 출력의 피크 높이를

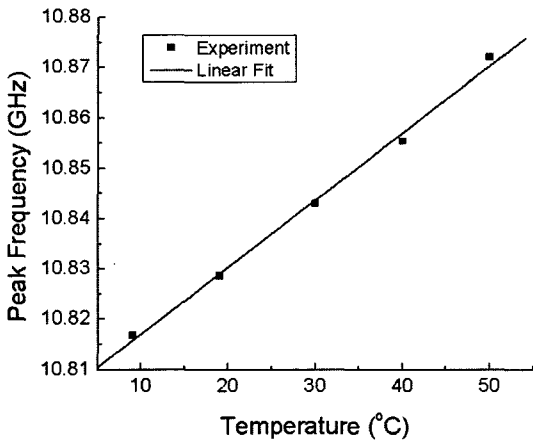
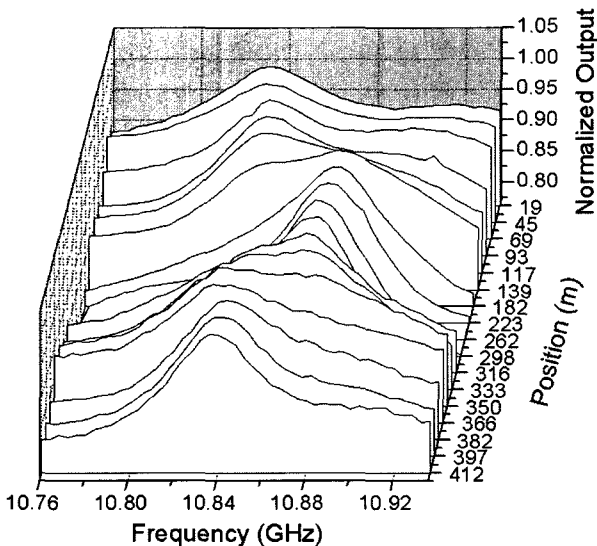


그림 7. 온도에 따른 브릴루앙 천이 주파수의 변화.

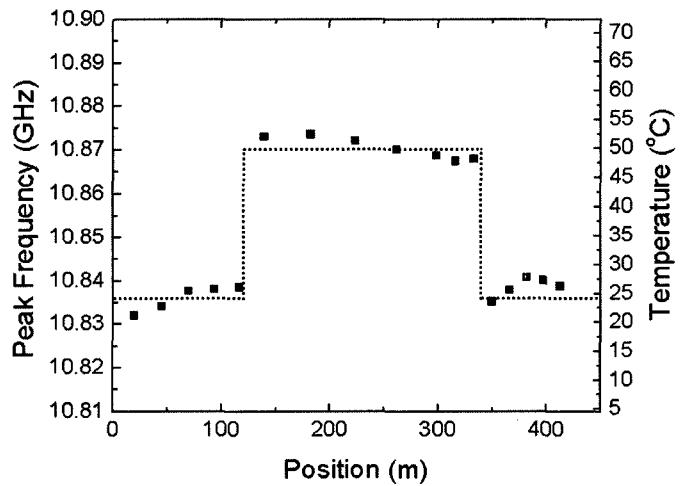
가 같도록 규격화하여 나타내었다. 그림 8(a)에서 보는 바와 같이 온도 변화에 따라 브릴루앙 이득 분포 변화는 모두 3영역으로 이루어짐을 알 수 있다. 프로브의 입사점에 가까운 챔버 외부 구간에서의 이득 피크는 대략 10.836 GHz 근처에 존재하였으며, 챔버 내부의 구간에서는 피크가 10.872 GHz 근처로 이동하였다. 다시 프로브의 출력단 쪽의 외부 구간에서는 피크는 10.836 GHz로 이동함을 볼 수 있다.

그림 8(b)는 그림 8(a)의 분포에서 각각의 계측 지점에 대한 피크 주파수를 계측 지점에 대한 함수로 나타낸 결과이다. 온도 챔버 외부 구간에서의 브릴루앙 천이 주파수의 평균치는 10.837 GHz이었으며, 챔버 내부 구간에서의 브릴루앙 천이 주파수의 평균치는 10.870 GHz로 측정되었다. 각 구간에서의 브릴루앙 천이 주파수의 편차는 대략 6 MHz였다. 온도 분포의 편차는 그림 7에서 구한 온도 변화율을 이용하면 약 4.5°C가 된다. 이 실험에서 ν_m 의 간격을 4 MHz로 설정하여 브릴루앙 천이 주파수의 분포를 측정하였기 때문에 브릴루앙 천이 주파수의 온도 변화율을 감안하면 기본적으로 3°C의 불확정도가 포함된다.

공간 선택적 브릴루앙 산란을 이용한 분포형 광섬유 센서 시스템의 분해능은 시험 광섬유 내에서 서로 교차된 펄프와 프로브 광주파수의 시간적 변화율에 의해 결정된다. 변조 주파수 f_m 이 브릴루앙 이득 선폭 $\Delta\nu_B$ 보다 작은 경우 시스템의 공간 분해능은 광주파수 변조 진폭 ν_A 와 변조 주파수 f_m 에 의해 결정되며, 변조 주파수 f_m 이 브릴루앙 이득 선폭 $\Delta\nu_B$ 보다 큰 경우에는 공간 분해능은 광주파수 변조 진폭 ν_A 에 의해서만 결정된다.^[10] 결과적으로 시스템의 공간 분해능은 실험에 사용된 LD의 광주파수 변조 특성에 의해 결정되며,



(a)



(b)

그림 8. 광섬유 길이를 따라 온도 변화가 있는 경우.

- (a) 광주파수 offset과 계측 지점에 따른 프로브 출력의 변화 분포(피크값이 같도록 규격화하였음)
- (b) 계측 지점에 따른 피크 주파수 분포와 온도 분포로 환산한 결과(점선은 실제 온도 분포)

광주파수 변조 진폭 ν_A 와 변조 주파수 f_m 이 각각 ~ 5 GHz와 ~ 10 MHz까지는 정현파를 이용한 광주파수 변조가 왜곡 없이 가능하므로 cm급의 공간 분해능의 구현이 가능할 것으로 생각된다. 그러나 브릴루앙 이득 피크에 의해 증폭되는 프로브의 신호는 상당히 감소하므로 OSA를 이용해 증폭된 프로브 신호를 실시간적으로 바로 측정하는 것은 불가능하다. 이 경우에 신호 대 잡음비의 개선을 위해 시간 평균화의 신호처리 과정이 필요하며, 이에 따른 측정 소요시간이 상당히 길어질 것으로 생각된다.

V. 결 론

직접 광주파수 변조된 LD로부터의 빛을 펌프와 프로브 광원으로 하여 시험 광섬유 내 특정 지점에서만 유도 브릴루앙 산란이 일어나도록 하였으며, 이를 이용해 분포형 광섬유 센서를 구성하고 실험하였다. LD의 주입 전류의 변조 주파수를 조절하여 계측 위치(브릴루앙 이득 피크의 위치)를 바꿀 수 있었으며, 펌프와 프로브 간의 광주파수 offset을 변화시키면서 프로브 출력의 이득 변화를 측정함으로써 분포형 계측이 가능함을 확인할 수 있었다.

분포형 센서로서의 동작을 확인하기 위하여 브릴루앙 천이 주파수가 서로 다른 두 종류의 광섬유(DSF와 SMF) 접속으로 시험 광섬유를 구성하여 실험한 결과, DSF와 SMF의 접속점을 중심으로 브릴루앙 이득이 최대가 되는 피크 주파수가 각각의 브릴루앙 천이 주파수인 10.788 GHz에서 10.836 GHz로 이동하는 것으로 측정되었다. 또한 시험 광섬유를 따라 온도 변화가 존재하는 경우에 대해 브릴루앙 천이 주파수 분포를 측정하였다. 온도 변화가 존재하는 구간을 확인할 수 있었으며, 온도 변화에 따라 브릴루앙 천이 주파수가 달라짐을 알 수 있었다. 브릴루앙 천이 주파수의 온도에 대한 변화율을 측정한 결과는 1.33 MHz/°C로 나타났다.

결론적으로, 공간 선택적 브릴루앙 산란 방식을 이용해 분포형 계측이 가능함을 실험적으로 확인하였다. 현재 공간 분해능 면에서 외국의 결과와 많은 차이가 있으나 이는 광스펙트럼 분석기만을 이용한 신속한 신호 측정을 위함이며, 신호 평균화와 측정 자동화를 통해 신호 대 잡음비를 올림으로써 쉽게 개선될 수 있을 것으로 보인다. 한편, 공간 선택적 방식의 브릴루앙 센서의 실용화를 위해서는 보다 향상된 공간 분해능과 넓은 측정 범위의 동시 구현이 필요하다. 이를 위해서 정현파 외의 보다 다양한 변조 파형의 적용에 대한 연구가 진행 중에 있다.

감사의 글

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었습니다. (KRF-2004-041-C00146) 실험에 도움을 주신 ETRI의 주무정 박사님과 전북대학교의 반재경 교수님께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] K. T. V. Grattan and B. T. Meggitt, *Optical Fiber Sensor Technology*, (Chapman & Hall, UK, 1995), pp. 350-363.
- [2] J. Dakin and B. Culshaw, *Optical Fiber Sensors Volume IV - Applications, Analysis, and Future Trends*, (Artech House, USA, 1997), pp. 313-319.
- [3] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, (Academic Press, USA, 1995), pp. 370-384.
- [4] D. Curverhouse, F. Farahi, C. N. Pannell, and D. A. Jackson, "Potential of stimulated Brillouin scattering as a sensing mechanism for distributed temperature sensors," *Electron. Lett.*, vol. 25, no. 14, pp. 913-915, 1989.
- [5] T. Horiguchi, T. Kurashima, and M. Tateda, "Tensile strain dependence of Brillouin frequency shift in silica optical fibers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 1, no. 5, pp. 107-108, 1989.
- [6] X. Bao, J. Dhliwayo, N. Heron, D. J. Webb, and D. A. Jackson, "Experimental and theoretical studies on a distributed temperature sensor based on Brillouin scattering," *J. Lightwave Technol.*, vol. 13, no. 7, pp. 1340-1348, 1995.
- [7] T. Horiguchi, T. Kurashima, H. Izumita, S. Furukawa, and Y. Koyamada, "Brillouin optical time-domain reflectometry," *IEICE Trans. Commun.*, vol. 76, no. 4, pp. 382-390, 1993.
- [8] T. Horiguchi and M. Tateda, "BOTDA - Nondestructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: Theory," *J. Lightwave Technol.*, vol. 7, no. 8, pp. 1170-1176, 1989.
- [9] S.-B. Cho, J.-J. Lee, and I.-B. Kwon, "Pulse base effect on the strain measurement of a Brillouin-scattering-based distributed optical fiber sensor," *Smart Mater. Struct.*, vol. 15, no. 2, pp. 315-324, 2006.
- [10] K. Hotate and M. Tanaka, "Measurement of Brillouin gain spectrum distribution along an optical fiber using a correlation-based technique - Proposal, experiment and simulation," *IEICE Trans. Electron.*, vol. 83, no. 3, pp. 405-412, 2000.
- [11] K. Hotate and T. Hasegawa, "A correlation-based continuous wave technique for measuring Brillouin gain spectrum distribution along an optical fiber with centimeter-order spatial resolution," in *14th International Conference on Optical Fiber Sensors*, A. G. Mignani and H. C. Laferve, Eds., Proc. SPIE, vol. 4185, pp. 651-661, 2000.
- [12] M. Tanaka and K. Hotate, "Application of correlation-based continuous-wave technique for fiber Brillouin sensing to measurement of strain distribution on a small size material," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, no. 5, pp. 675-677, 2002.
- [13] K. Hotate and H. Arai, "Enlargement of measurement range of simplified BOCDA fiber-optic distributed strain sensing system using a temporal gating scheme," in *17th*

- International Conference on Optical Fiber Sensors, M. Voet, R. Willsch, W. Ecke, J. Jones, and B. Culshaw, Eds., Proc. SPIE, vol. 5855, pp. 184-187, 2005.
- [14] K. Y. Song, Z. He, and K. Hotate, "Optimization of Brillouin optical correlation domain analysis system based on intensity modulation scheme," *Opt. Express*, vol. 14, no. 10, pp. 4256-4263, 2006.
- [15] X. Bao, D. J. Webb, and D. A. Jackson, "22-km distributed temperature sensor using Brillouin gain in an optical fiber," *Opt. Lett.*, vol. 18, no. 7, pp. 552-554, 1993.
- [16] H. Naruse and M. Tateda, "Trade-off between the spatial and the frequency resolutions in measuring the power spectrum of the Brillouin backscattered light in an optical fiber," *Appl. Opt.*, vol. 38, no. 31, pp. 6516-6521, 1999.
- [17] 윤승철, 서민성, 박희갑, "공간 선택적 브릴루앙 산란을 이용한 분포형 광섬유 센서의 시뮬레이션," *한국광학회지*, 제 17권 2호, pp. 127-135, 2006.

Experiment of Distributed Optical Fiber Sensor Using Spatially-Selective Brillouin Scattering

Min Sung Seo, Seung Chul Yun, Jin Young Hyun, and Hee Gap Park[†]

Department of Physics, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, KOREA

[†]*E-mail: hgpark@chonbuk.ac.kr*

(Received February 23, 2006, Revised manuscript May 23, 2006)

We demonstrate a distributed fiber sensor system based on spatially-selective Brillouin scattering, using a single laser diode as a light source whose optical frequency is directly modulated by the injection current. The pump and the counter-propagating probe lights, which are sinusoidally frequency-modulated, are superposed in the fiber so that stimulated Brillouin scattering takes places only at a specific location along the fiber. Brillouin gain peak position is controlled by varying the modulation frequency. Distributions of Brillouin shift frequency are measured for the case of concatenated optical fibers of two different kinds and also for the case of temperature distribution. The temperature coefficient of the Brillouin shift frequency is measured to be 1.33 MHz/°C.

OCIS Codes : 060.2370, 060.4080, 190.4370, 290.5830.