

공간 선택적 브릴루앙 산란을 이용한 분포형 광섬유 센서의 시뮬레이션

윤승철 · 서민성 · 박희갑[†]

전북대학교 물리학과

Ⓣ 561-756 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14

(2006년 2월 13일 받음, 2006년 4월 4일 수정본 받음)

광주파수 변조된 펄프와 프로브 빛의 광섬유 내 중첩을 시간 영역에서 직접 다루는 방법으로 공간 선택적 브릴루앙 산란 방식의 분포형 광섬유 센서를 시뮬레이션 하였다. 광섬유 내 브릴루앙 이득 분포의 시간/공간적 변화를 구하였고, 이중 광섬유의 접속과 온도 분포가 존재하는 경우에 대해 시뮬레이션 하여 분포형 센서로서 합당한 결과를 얻었다. 변조 파형으로서 정현파 대신에 삼각파를 이용한 경우에 정현파에 비해 공간 분해능 면에서 유리한 것으로 나타났다.

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

I. 서 론

브릴루앙 산란(Brillouin scattering)은 광섬유 내에서 일어나는 비선형 광학 현상의 하나이다.^[1] 브릴루앙 산란에 의한 브릴루앙 천이 주파수는 광섬유 주위의 온도나 스트레인에 의해 선형적으로 변하는 특성을 갖는다.^[2-4] 따라서 이러한 특성을 이용해 브릴루앙 천이 주파수를 측정함으로써 온도, 스트레인, 압력, 화학 조성 분포 등을 측정할 수 있다.^[2-6] 특히 브릴루앙 광섬유 센서는 이러한 물리 변수들의 공간적 분포를 측정할 수 있으므로 분포형 센서 기술로 유망하다.^[5-12] 브릴루앙 산란을 이용하는 분포형 광섬유 센서 방식에는 BOTDR(Brillouin Optical Time Domain Reflectometry) 방식^[7]과 BOTDA(Brillouin Optical Time Domain Analysis) 방식,^[8-9] 그리고 BOCDA(Brillouin Optical Correlation Domain Analysis) 방식^[10-12] 등이 있다.

펄프 광원으로 펄스 광원을 사용하는 BOTDR 방식과 BOTDA 방식의 경우 공간 분해능의 이론적 한계는 약 1 m 정도인 것으로 알려져 있다.^[13] 따라서 펄스 광원을 이용하는 방식의 경우 정밀한 위치 결정이 필요한 응용 분야에 적용하기는 어려운 단점이 존재한다. 이러한 공간 분해능의 단점을 개선하기 위해 제안된 BOCDA 방식은 일종의 공간 선택적 브릴루앙 산란을 이용하는 방식이다.^[10-12] 이 방식은 펄프(pump)와 프로브(probe) 광원으로서 광주파수 변조된 연속발전 형태의 광원을 이용한다. 광원의 광주파수를 정현파로 변조하고 변조 주파수를 적절히 선택하면 광섬유 내 특정 위치에서만 공간 선택적으로 브릴루앙 산란이 발생되도록 할 수 있다. 이 경우 수 cm급의 공간 분해능이 가능한 것으로 보고 되어 있다.^[11-12] 다만, 공간 분해능이 개선되는 대신에 측정 범위가 좁아지는 문제점이 존재한다.^[11]

이러한 공간 선택적 브릴루앙 산란 방식을 정확히 이해하

고 응용하기 위해서는 변조 주파수와 공간상의 브릴루앙 이득 분포에 대한 상관관계를 명확히 규명하고 시뮬레이션해 볼 필요가 있다. 기존에 제안된 이론에 의한 시뮬레이션 방식은 펄프와 프로브 빛 간의 결합 방정식(coupled equation)을 주파수 영역에서 풀어서 시험 광섬유 내 브릴루앙 산란의 공간적 분포를 구하는 방식이다.^[10] 그러나 이 방식은 정현파 외의 변조파에 대해서는 주파수 대역의 스펙트럼이 매우 복잡해 지므로 공간상의 브릴루앙 이득 분포를 구하기 위해서는 복잡한 방정식을 풀어야 한다. 특히 BOCDA 방식의 약점인 측정 범위의 문제를 해결하려면 정현파 외에 다른 형태의 변조 파형에 대해서도 연구되어야 하는데, 이 경우에 전체적인 양상을 직관적으로 이해하는데 어려움이 존재한다.

따라서 본 논문에서는, 이러한 문제점을 보완하기 위해, 광주파수 변조된 펄프와 프로브 빛의 공간상의 중첩을 시간 영역에서 직접 다루는 방식의 시뮬레이션 방법을 제안하고 이를 수행하였다. 주파수 영역에서 변조 파형을 다루는 기존의 시뮬레이션 방식 보다는 변조 파형을 시간 영역에서 다루는 방식이므로 다양한 변조 파형에 대해 적용이 용이하고 직관적으로 이해하기 쉽다는 장점을 가지고 있다. 본 논문에서는 시간 영역에서 펄프와 프로브 빛의 공간 중첩을 다루는 방식으로 공간 선택적 브릴루앙 산란을 컴퓨터 시뮬레이션 하여 브릴루앙 이득 분포의 시간/공간적 변화를 구하였다. 센서용 광섬유가 브릴루앙 천이 주파수가 서로 다른 두 종류의 광섬유 접속으로 이루어진 경우와, 광섬유를 따라 온도 분포가 존재하는 경우에 대해 시뮬레이션 하여 분포형 센서 시스템에의 적용성을 검토하였다. 마지막으로, 변조 파형으로 삼각파를 사용하는 경우에 대해 시뮬레이션 하여 정현파의 경우와 비교해 보았다.

II. 기본 원리

공간 선택적 브릴루앙 산란 방식의 기본 개념도는 그림 1

[†] E-mail: hgpark@chonbuk.ac.kr

과 같다. 직접 광주파수 변조된 레이저 다이오드를 광원으로 사용하는데, 광주파수의 변조 파형으로는 대칭성이 있는 임의 형태의 파형을 사용하는 것이 가능하다. 그러나 이 절에서는 원리 설명의 편의상 정현파로 변조하는 경우의 예를 들어 설명하고자 한다.

변조 주파수 f_m 의 정현파로 광주파수 변조된 광원의 빛을 둘로 나누어 각각 펌프와 프로브 빛으로 사용한다. 그 중 프로브 빛에 고속 외부 변조 또는 직접 주파수 변조 등의 방법으로 광주파수 이동을 일으켜 변조된 펌프와 프로브 빛 사이에 브릴루앙 천이 주파수 근처의 주파수 offset이 있도록 하고, 그림 1과 같이 광섬유 내로 서로 반대 방향으로 입사시켜 진행시킨다. 그러면 광섬유의 특정 지점에서는 서로 반대 방향으로 진행하는 펌프와 프로브 빛 간의 광주파수 차이가 시간에 관계없이 항상 일정하게 유지된다. 만일 펌프와 프로브 빛 간의 광주파수 offset이 광섬유의 브릴루앙 천이 주파수와 일치하면 그 지점에서만 프로브 빛의 브릴루앙 광증폭이 발생한다. 이에 관하여 상세히 덧붙여 설명하면 다음과 같다.

광섬유 내 서로 반대 방향으로 진행하는 펌프와 프로브의 광주파수 파형을 자세히 살펴보면 그림 2와 같다. 그림 2(a)에서 실선과 점선은 Δt 의 시간 변화에 따른 광주파수 파형의 변화를 나타낸다. 각각의 광주파수가 정현파로 변조된 경우를 나타냈으며, 광주파수 변조 진폭은 ν_A , 주기는 $1/f_m$ 이다. 만일 펌프와 프로브의 광주파수 파형 간의 광주파수

offset이 0인 경우를 가정한다면, 서로 반대 방향으로 진행하는 두 빛이 중첩되어 광주파수 파형은 정상파를 이룰 것이다. 이때 주파수 차가 0이 되는 지점마다 정상파의 마디가 반주기 간격으로 만들어지며, 이 마디 위치에서는 주파수 차이가 항상 0으로 일정하게 유지될 것이다. 이러한 정상파의 마디들의 위치를 $z = z_m$ (m 은 정수)이라 하자.

이번에는 펌프와 프로브의 광주파수 파형 간의 광주파수 offset이 ν_0 인 경우를 생각하자. 이 경우에, 앞에서와 같은 논리로, $z = z_m$ 인 지점에서는 펌프와 프로브 빛 간의 광주파수 차이가 시간에 관계없이 ν_0 로 일정하게 유지된다. 이는 그림 2에서도 확인할 수 있는데, 임의의 시점의 펌프와 프로브 파형(실선 파형) 간의 광주파수 차이가 시간이 Δt 만큼 경과한 후의 펌프와 프로브 파형(점선 파형) 간의 광주파수 차이와 변화가 없음을 볼 수 있다. 만일 펌프와 프로브 변조 파형 간의 광주파수 offset ν_0 가 광섬유의 브릴루앙 천이 주파수 ν_B 와 일치한다면, $z = z_m$ 의 위치에서는 펌프와 프로브 간의 광주파수 차이가 브릴루앙 천이 주파수와 항상 일치하므로 브릴루앙 이득은 항상 최대가 된다. 따라서 그림 2(b)와 같이 광섬유 내 공간 영역에서 주기적인 피크를 갖는 브릴루앙 이득 분포가 형성되며, 프로브 빛은 광섬유 내부를 진행하는 동안 주기적인 피크를 갖는 브릴루앙 이득 분포를 겪으면서 증폭된다. 만일 이러한 이득 피크가 시험 광섬유(센서용 광섬유) 내에 단 하나만 존재하도록 여러 변수들(변조 주파수 f_m , 시험 광섬유 길이 l , 지연 광섬유 길이 l_d)의 값을 정하

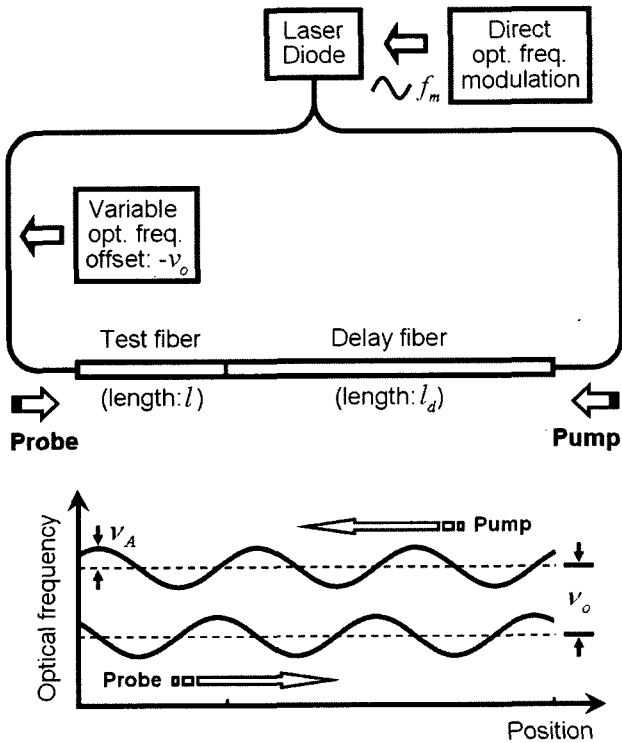
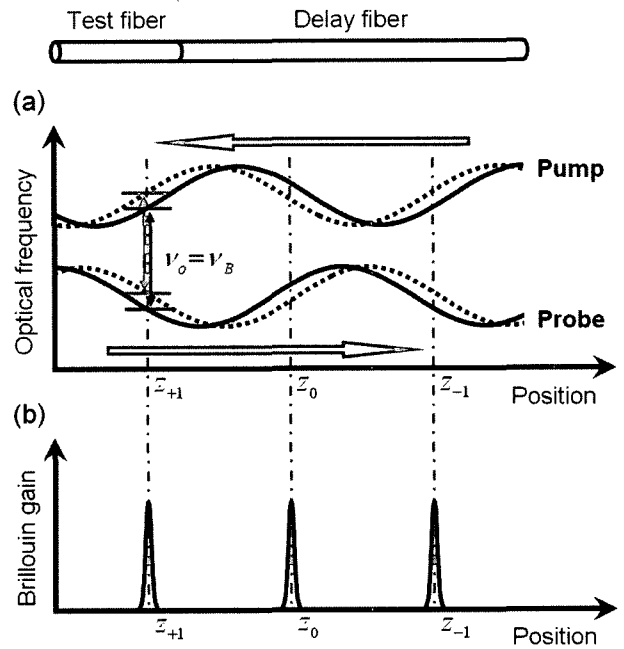


그림 1. 광주파수 변조된 광원을 이용한 공간 선택적 브릴루앙 산란 방식의 기본 개념도 (f_m 변조 주파수; ν_A 광주파수 변조 진폭; ν_0 펌프와 프로브 간의 광주파수 offset; l 시험 광섬유 길이; l_d 지연 광섬유 길이).



(a) 시간 변화에 따른 펌프와 프로브의 광주파수 파형의 변화.
(b) 공간상에 주기적으로 존재하는 브릴루앙 이득 분포.

그림 2. 정현파로 광주파수 변조된 펌프와 프로브 빛에 의해 발생하는 공간상의 브릴루앙 이득 분포 (ν_B 브릴루앙 천이 주파수; z_m 광섬유 내 브릴루앙 이득 피크의 위치).

면 브릴루앙 증폭된 프로브 빛은 시험 광섬유 내 특정 지점의 정보를 일의적으로 대변할 수 있게 된다. 한편 변조 주파수 f_m 을 변화시키면 이득 피크의 위치 z_m 을 바꿀 수 있으며, 측정 범위는 변조 주파수 f_m 의 반주기로 주어진다.

III. 시뮬레이션 이론

앞 절에서 설명한 공간 선택적 브릴루앙 산란에 의한 브릴루앙 이득 분포와 프로브의 광출력을 시뮬레이션 하는데 사용된 이론을 기술하면 다음과 같다. 프로브 빛의 광주파수 ν_s 와 반대 방향으로 진행하는 펌프 빛의 광주파수 ν_p 를 각각 식으로 나타내면 식 (1)과 식 (2)와 같다.

$$\nu_s(z, t) = \nu_A F\left(t - \frac{n}{c}z\right) - \nu_o \quad (1)$$

$$\nu_p(z, t) = \nu_A F\left(t + \frac{n}{c}z + \phi\right) \quad (2)$$

위의 식에서 $F(z, t)$ 는 광주파수 변조 파형인데 한주기 내에서 우함수 형태를 갖는 일반적인 파동 함수를 의미하며, ν_A 는 광주파수의 변조 진폭, n 은 광섬유의 굴절률, c 는 진공에서의 빛의 속도, ϕ 는 위상 지연, 그리고 ν_o 는 펌프와 프로브의 광주파수 변조 파형 간의 offset을 나타낸다. 변조 파형으로서 정현파를 이용하는 경우에는 앞 절의 원리 설명에서 사용된 변수들을 이용해 위의 식을 다음과 같이 보다 구체적으로 표현할 수 있다.

$$\nu_s(z, t) = \nu_A \cos\left[2\pi f_m\left(t - \frac{n}{c}z\right)\right] - \nu_o \quad (3)$$

$$\nu_p(z, t) = \nu_A \cos\left[2\pi f_m\left(t + \frac{n}{c}\left(z - (l + l_d)\right)\right)\right] \quad (4)$$

프로브 빛이 시험 광섬유의 시작단인 $z=0$ 에 입사되는 순간에, 펌프 빛은 지연 광섬유의 끝단인 $z=l+l_d$ 에 프로브 빛과 같은 위상을 갖는 상태로 입사되는 것으로 가정하였다. 본 연구의 시뮬레이션에서 정현파 변조의 경우에는 식 (3), (4)를 사용하였으며, 다른 임의 파형(예: 삼각파)의 경우에는 보다 일반적인 표현식인 식 (1), (2)를 사용하였다.

펌프와 프로브 빛이 광주파수 변조되어 시간과 공간에 따라 변하므로, 펌프와 프로브 빛의 광주파수 차이에 의해 결정되는 광섬유 내 브릴루앙 이득 역시 시간과 공간의 함수가 된다. 이때 브릴루앙 이득 스펙트럼은 일반적으로 로렌치안(Lorentzian) 함수 형태를 가지는데,^[14] 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$g_B(z, t) = g_0 \frac{\left(\frac{\Delta\nu_B}{2}\right)^2}{(\nu_p - \nu_s - \nu_B)^2 + \left(\frac{\Delta\nu_B}{2}\right)^2} \quad (5)$$

위의 식에서 g_B 는 브릴루앙 이득, $\Delta\nu_B$ 는 브릴루앙 이득

스펙트럼의 반치선폭, 그리고 g_0 는 브릴루앙 천이 주파수에서의 브릴루앙 이득 피크값을 나타낸다.

대부분의 브릴루앙 산란의 응용에서는 증폭된 프로브의 광파워를 측정하며, 또한 변조 파형의 주기에 비해 충분히 긴 시간에 걸쳐 누적된 결과를 측정한다.^[10] 따라서 광섬유 내 브릴루앙 이득의 공간 분포는 일반적으로 매순간 변하지만, 실제 응용에서 보다 의미있는 것은 한주기 $T(=1/f_m)$ 에 대해 시간 평균화된 이득 분포이다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$g_B'(z) = \frac{1}{T} \int_0^T g_B(z, t) dt \quad (6)$$

위의 식에서 $g_B'(z)$ 는 시간 평균화된 브릴루앙 이득 분포로서 공간만의 함수가 된다. 이때 시간 평균화된 브릴루앙 이득 분포 $g_B'(z)$ 는 펌프와 프로브 간의 광주파수 offset ν_o 의 변화에 따라 분포 양상이 달라지며, 광주파수 offset ν_o 가 브릴루앙 천이 주파수 ν_B 와 같아질 때 그림 2에서 설명한 $z=z_m$ 의 위치에서 최대 피크를 갖는다.

프로브 빛은 광섬유를 지나는 동안 평균적으로 식 (6)에 의한 브릴루앙 이득의 공간 분포를 겪으면서 증폭된다. 프로브로 변환되는 펌프 파워가 매우 작아 펌프 고갈(pump depletion)을 무시할 수 있다고 가정하면, 광섬유 내 프로브 빛의 세기 변화를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{dI_s}{dz} = g_B'(z) I_p I_s - \alpha I_s \quad (7)$$

위의 식에서 I_s 는 프로브 빛의 세기, I_p 는 펌프 빛의 세기, 그리고 α 는 광섬유의 손실을 나타낸다. 펌프와 프로브의 편광이 서로 일치하는 것으로 가정하였다. 최종적으로 시험 광섬유 끝단에서 측정되는 프로브 세기는 식 (7)을 시험 광섬유 길이 l 에 대해 적분하여 구할 수 있으며, 그 결과는 식 (8)과 같이 표현된다.

$$I_s(l) = \exp\int_0^l [g_B'(z) I_p - \alpha] dz \quad (8)$$

식 (8)에서 시간 평균화된 브릴루앙 이득 분포 $g_B'(z)$ 는 광주파수 offset ν_o 에 의존하므로, 시험 광섬유의 끝단에서 측정된 프로브의 세기 또한 광주파수 offset ν_o 에 따라 그 크기가 달라진다. 광주파수 offset ν_o 가 브릴루앙 천이 주파수 ν_B 와 일치하는 경우에 브릴루앙 이득 피크의 위치에서 프로브 빛의 광증폭이 가장 크게 일어나므로, 광주파수 offset ν_o 를 변화시키면서 프로브의 세기 변화를 관찰하면 이득 피크 위치에서의 브릴루앙 천이 주파수를 구할 수 있다. 변조 주파수 f_m 을 조절하여 브릴루앙 이득 피크의 위치를 변화시키면서 브릴루앙 천이 주파수 ν_B 를 측정하면, 시험 광섬유 전체에 걸쳐 물리 변수(온도, 스트레인, 압력 등)에 대한 분포형 계측이 가능하다.

IV. 시뮬레이션 및 결과

앞 절에서 전개한 이론에 따라 먼저 광주파수 변조 파형으로 정현파를 이용하여 광주파수 offset의 변화에 따른 브릴루앙 이득 분포의 시간과 공간에 따른 변화를 시뮬레이션 하였다. 다음으로 분포형 센서로서의 검증을 위해, 시험 광섬유가 서로 다른 두 종류의 광섬유 접속으로 이루어진 경우와 시험 광섬유를 따라 온도 분포가 존재하는 경우에 대해 각각 시뮬레이션을 수행하였다. 마지막으로 변조 파형으로 삼각파를 이용하는 경우에 대해 시뮬레이션 하여 브릴루앙 이득 분포와 공간 분해능을 정현파 변조의 경우와 서로 비교해 보았다. 시뮬레이션에 사용된 변수들은 표 1과 같다.

가. 브릴루앙 이득 분포의 시간/공간적 변화

시험 광섬유 내 브릴루앙 이득 분포의 시간과 공간에 따른 변화를 변조파의 한주기에 걸쳐 구하여, 그 결과를 그림 3에

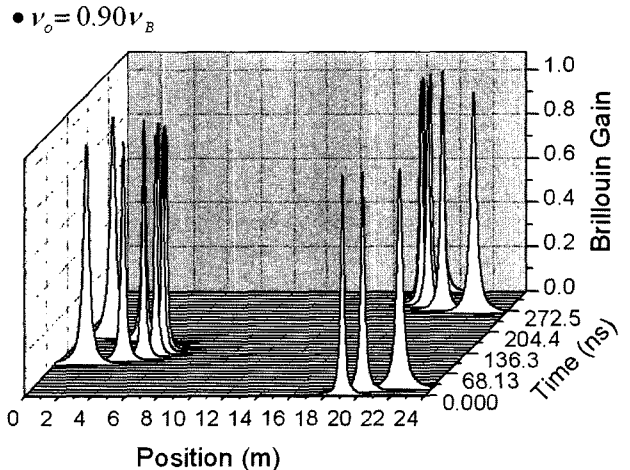
표 1. 시뮬레이션에 사용된 변수들

공통 변수들		
변수	값	설 명
f_m	2.70 ~ 3.42 MHz	변조 주파수
ν_A	1 GHz	광주파수 변조 진폭
ν_o	10.6 ~ 11.1 GHz	광주파수 offset
P_s	30 μ W	프로브 파워
P_p	40 mW	펌프 파워
l	24 m	시험 광섬유 길이
l_d	68 m	지연 광섬유 길이
n	1.46	광섬유 굴절률
α	0.4 km/dB	광섬유 손실

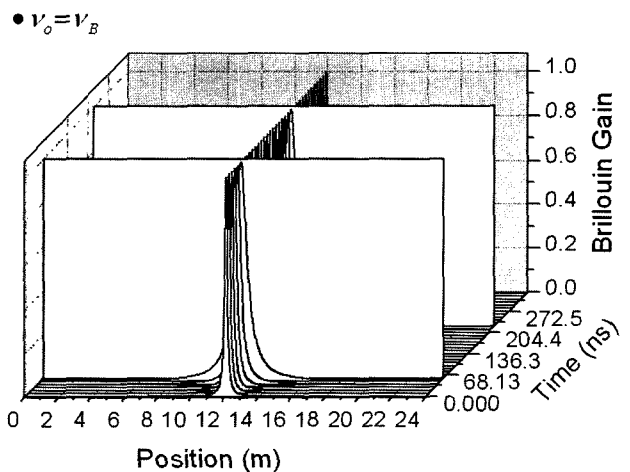
광섬유 A		
변수	값	설 명
ν_B	10.85 GHz	브릴루앙 천이 주파수
$\Delta\nu_B$	30 MHz	반치선폭
g_0	5.0×10^{-11} m/W	브릴루앙 이득 피크값
A_{eff}	89.9 μ m ²	유효 단면적

광섬유 B		
변수	값	설 명
ν_B	10.75 GHz	브릴루앙 천이 주파수
$\Delta\nu_B$	35 MHz	반치선폭
g_0	2.7×10^{-11} m/W	브릴루앙 이득 피크값
A_{eff}	63.7 μ m ²	유효 단면적

나타내었다. 그림 3(a)는 광주파수 offset이 브릴루앙 천이 주파수와 일치하지 않는 경우의 한 예($\nu_o = 0.90 \nu_B$)를 나타낸다. 이때 세로축은 규격화된 브릴루앙 이득을 나타낸다. 브릴루앙 이득이 최대가 되는 지점은 펌프와 프로브의 광주파수 차이가 브릴루앙 천이 주파수와 일치하는 지점이다. 그러나 공간상의 위치를 고정시킨 상태에서 광주파수의 변화를 살펴보면, 두 빛의 광주파수가 정현파로 변조되었기 때문에 광주파수 차는 연속적으로 변하게 된다. 따라서 공간상의 브릴루앙 이득 피크는 주기적으로 변하게 되고 광섬유 내 어느 지점에서든 시간에 무관하게 지속적으로 프로브는 증폭되지 않는다. 그러나 그림 3(b)와 같이 광주파수 offset이 브릴루앙 천이 주파수와 일치하는 경우($\nu_o = \nu_B$), 시간의 변화에 관계없이 특정 위치에 브릴루앙 이득 피크는 고정된다. 그러나 그림 3(b)에서 볼 수 있듯이, 공간상의 브릴루앙 이득 분포의 모양은 주기적으로 변하게 된다. 그리고 서로 반대 방향으로 진행되는 펌프와 프로브의 광주파수 변조 파형이 정확히 일



(a) 광주파수 offset이 브릴루앙 천이 주파수와 일치하지 않는 경우.



(b) 광주파수 offset이 브릴루앙 천이 주파수와 일치하는 경우.

그림 3. 정현파로 광주파수 변조된 경우 한주기 동안 광섬유 내 브릴루앙 이득 분포의 시간과 공간에 따른 변화.

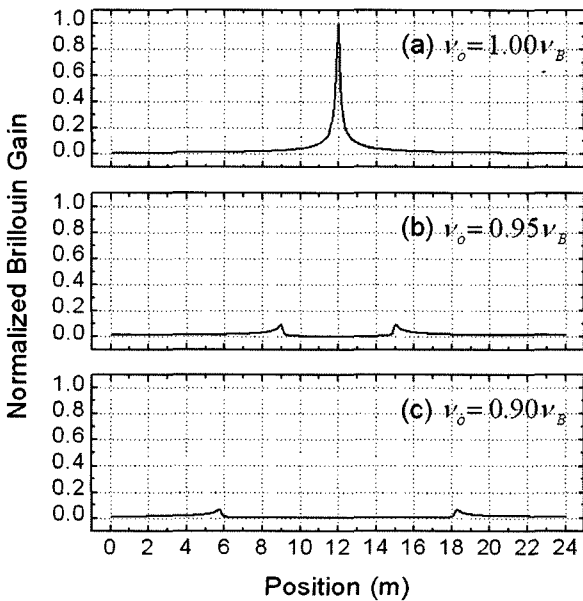
치(광주파수 offset만이 존재)하는 순간이 한주기 안에 두 번 존재하는데, 이때는 광섬유의 길이 전체에 걸쳐 두 빛 간의 광주파수 차이가 브릴루앙 천이 주파수와 일치하게 되고 브릴루앙 이득은 순간적으로 최대가 된다.

그림 3에서 보는 바와 같이, 광주파수 offset의 브릴루앙 천이 주파수와 일치 여부에 따라 브릴루앙 이득의 공간 분포의 시간적 변화 양상은 달라진다. 그림 4는 그림 3의 결과를 한주기에 걸쳐 시간 평균화하여 그 결과를 나타낸 것으로서, 광주파수 offset이 각각 $\nu_o = \nu_B$, $\nu_o = 0.95 \nu_B$, 그리고 $\nu_o = 0.90 \nu_B$ 인 경우이다. 광주파수 offset이 $\nu_o = \nu_B$ 인 경우, 한 지점에서 뚜렷한 브릴루앙 이득 피크가 존재함을 알 수 있다. 그러나 광주파수 offset이 $\nu_o = 0.95 \nu_B$ 인 경우, 중앙의 이득 피크는 둘로 갈라져 크기가 1보다 매우 작은 두개의 피크가 만들어진다. 광주파수 offset이 $\nu_o = 0.90 \nu_B$ 일 때는 $0.95 \nu_B$ 일 때보다 피크의 간격은 더 멀어지며 크기 또한 작아진다. 이때 피크의 최대값은 $\nu_o = \nu_B$ 인 경우에 비하여 7% 이하로 매우 작았다. 그림 4(a)에서 공간 분해능을 시간 평균화된 브릴루앙 이득 분포의 반치선폭이라 정의할 경우, 공간 분해능은 28 cm가 된다. 시스템의 분해능은 광주파수 변조 진폭 ν_A 와 변조 주파수 f_m 에 의해 결정되며, 변조 진폭 ν_A 또는 변조 주파수 f_m 을 증가시킬 경우 공간 분해능을 향상시킬 수 있다. 예를 들어 변조 진폭 ν_A 가 2.5 GHz이고, 변조 주파수 f_m 이 30 MHz인 경우 공간 분해능은 1 cm가 된다. 하지만 공간 분해능이 향상되는 경우 컴퓨터 계산 시간 또한 증가하게 된다.

그림 5는 $\nu_o = \nu_B$ 인 경우에 변조 주파수를 달리함에 따라 브릴루앙 이득 피크의 위치를 이동시킬 수 있음을 보여준다.

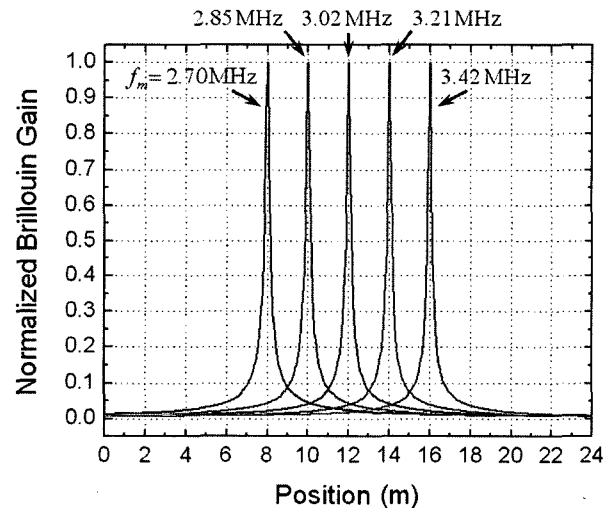
그림 5(a)는 5개의 변조 주파수에 대한 브릴루앙 이득 분포의 결과를 나타낸다. 각각의 피크의 간격은 2 m이며, 변조 주파수가 작아질수록 시험 광섬유의 입력단 쪽으로 피크가 이동함을 알 수 있다. 한편, 변조 주파수를 연속적으로 변화시키면서 이득 피크의 위치 변화를 살펴보았다. 그 결과는 그림 5(b)와 같다. 변조 주파수가 커질수록 피크의 위치는 증가하지만 선형적으로 변하지는 않았다.

이상의 브릴루앙 이득 분포에 대한 시뮬레이션 결과를 종합하여 요약하면 다음과 같다. 펌프와 프로브 빛이 정현파로 변조되므로 두 빛 간의 광주파수 차는 시간에 따라 연속적으로 변한다. 이때 광주파수 offset이 브릴루앙 천이 주파수와 일치하지 않으면, 공간상의 이득 피크의 위치는 특정 지점에 고정되지 않고 주기적으로 변하게 된다. 따라서 이를 시간 평균화할 경우 공간상의 이득 분포는 매우 작아져 큰 의미를 갖지 못한다. 그러나 광주파수 offset이 브릴루앙 천이 주파수와 일치하거나 브릴루앙 선폭 이내로 근접한 경우, 시간

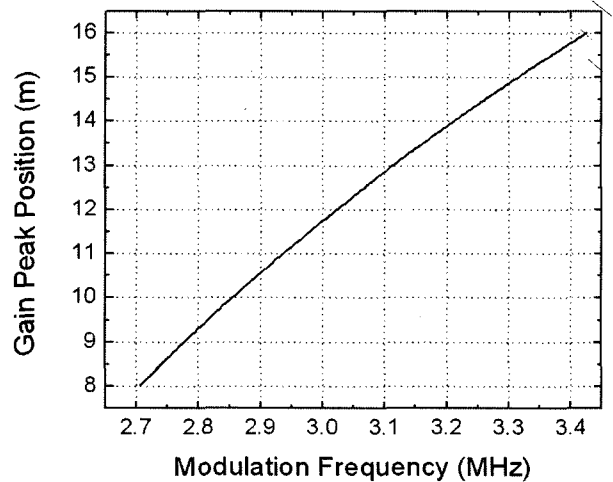


(a) $\nu_o = \nu_B$, (b) $\nu_o = 0.95 \nu_B$, (c) $\nu_o = 0.90 \nu_B$

그림 4. 광주파수 offset에 따른 시간 평균화된 브릴루앙 이득 분포



(a) 변조 주파수의 변화에 따른 공간상의 브릴루앙 이득 분포



(b) 변조 주파수에 따른 이득 피크의 위치 변화.

그림 5. 변조 주파수의 변화에 따른 브릴루앙 이득 피크의 이동.

평균화된 브릴루앙 이득 피크는 특정 지점에 고정되며 변조 주파수를 조절하여 피크의 위치를 적절히 바꿀 수 있다. 따라서 원하는 계측 지점에 이득 피크를 위치시키고 광주파수 offset를 연속적으로 변화시키면서 프로브 출력 파워를 측정하면 브릴루앙 천이 주파수를 측정할 수 있다.

나. 이종 광섬유의 접속

시험 광섬유가 서로 다른 브릴루앙 천이 주파수를 갖는 광섬유 A와 광섬유 B의 접속으로 이루어진 경우에 대해, 시험 광섬유 상의 위치에 따른 브릴루앙 천이 주파수의 분포를 시뮬레이션 한 후 그 결과를 살펴보았다. 시험 광섬유의 구성 순서는 광섬유 A, 광섬유 B, 그리고 광섬유 A이다. 이때 각각의 광섬유의 길이는 10 m, 4 m, 그리고 10 m로 시험 광섬유의 총 길이는 24 m이다. 변조 주파수를 조절하여 25 cm 간격으로 계측 지점(이득 피크의 위치)을 설정하였다. 광주파수 offset을 10.6 GHz에서 11.1 GHz까지 1 MHz 간격으로 변화시키면서 증폭된 프로브 출력 파워를 구하였으며, 그 결과는 그림 6과 같다.

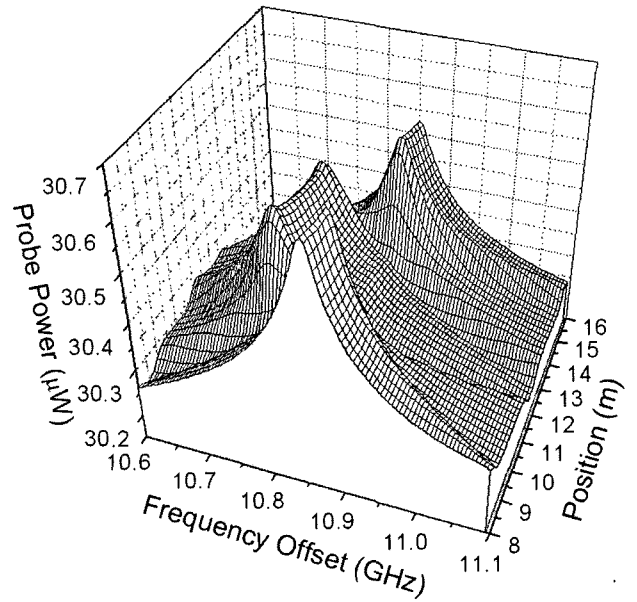
그림 6(a)는 광주파수 offset에 따른 프로브 출력 파워의 변화를 시험 광섬유 내 위치에 대한 함수로 구한 결과이다. 그림 6(a)에서 피크의 위치는 시험 광섬유의 분포와 같이 세 영역으로 구성된다. 광섬유 A의 영역에서는 10.85 GHz에서 피크를 가지며, 광섬유 B의 영역에서는 피크가 10.75 GHz로 이동했음을 알 수 있다. 다시 14 m 이후의 광섬유 A의 영역에서는 피크가 다시 10.85 GHz에 존재하게 된다.

그림 6(a)에서 각각의 계측 지점에 대한 피크 주파수를 구하여, 그 결과를 그림 6(b)에 나타내었다. 계측 지점에 따른 피크 주파수의 변화는 시험 광섬유 내 브릴루앙 천이 주파수의 분포와 일치하였다. 한편, 광섬유의 경계점인 10 m와 14 m 부근에서는 브릴루앙 천이 주파수와 반치선폭이 달라지므로 피크 주파수가 10.85 GHz와 10.75 GHz 사이의 값으로 나타났다.

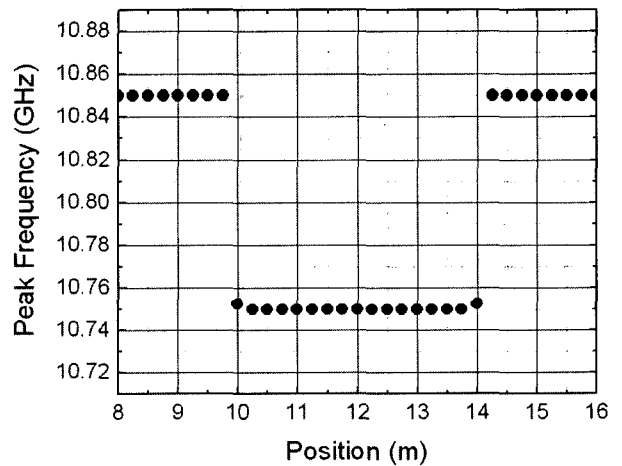
다. 온도 분포 계측

광섬유 A로만 구성된 시험 광섬유에서 광섬유 길이를 따라 온도 분포가 존재하는 경우에 대해서 브릴루앙 천이 주파수의 분포를 시뮬레이션을 이용해 구하였다. 시험 광섬유에 주어진 가상의 온도 분포는 그림 7(a)와 같다. 시험 광섬유의 총 길이는 24 m이며, 10 m에서 14 m까지의 4 m 영역에서만 온도 변화가 존재한다고 가정하였다. 이때 온도 변화에 따른 브릴루앙 천이 주파수의 온도에 대한 변화율을 1.02 MHz/°C로 가정하였고,^[5] 온도 20°C에서 브릴루앙 천이 주파수를 10.85 GHz로 설정하였다.

그림 7(b)는 계측 지점에 따른 증폭된 프로브 출력 파워의 분포 변화를 나타낸다. 온도 변화에 따라 프로브 파워 분포의 변화는 모두 5단계로 이루어짐을 알 수 있다. 피크 주파수는 10.85 GHz, 10.891 GHz, 10.809 GHz, 10.860 GHz, 그리고 10.85 GHz이며, 이를 브릴루앙 천이 주파수의 변화율



(a) 광주파수 offset과 계측 지점에 따른 프로브 출력 파워 분포의 시뮬레이션 결과.



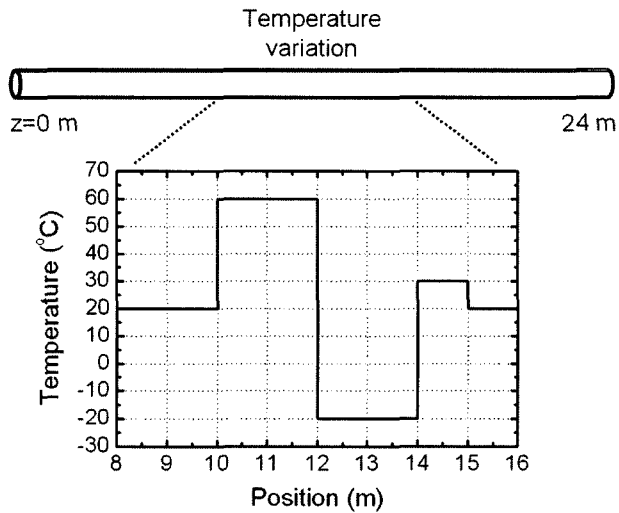
(b) 증폭된 프로브 출력 파워 분포의 계측 지점에 따른 피크 주파수 분포

그림 6. 시험 광섬유가 이종 광섬유의 접속으로 이루어진 경우.

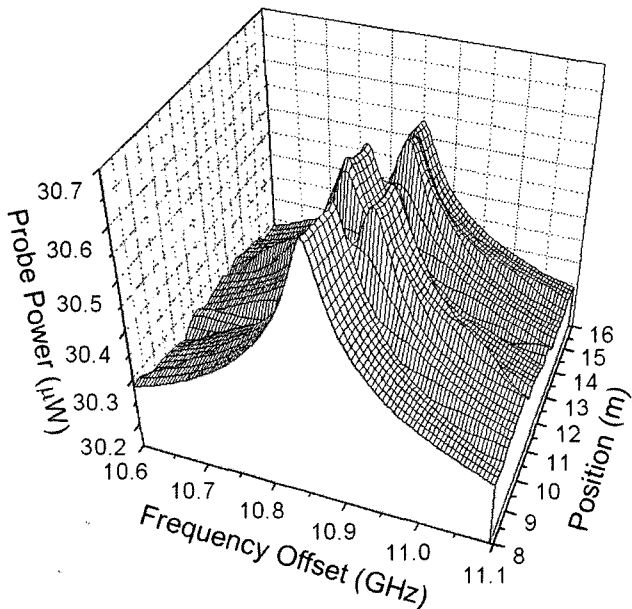
을 이용해 온도로 환산하면 20°C, 60°C, -20°C, 30°C, 그리고 20°C가 되므로, 시험 광섬유에 주어진 온도 분포와 일치함을 알 수 있다. 온도 변화가 급격히 이루어지는 지점의 경우, 앞에서와 같이 각각의 브릴루앙 천이 주파수 사이의 값을 갖는 것으로 나타났다.

라. 삼각파의 경우 시간/공간적 브릴루앙 이득 변화

광주파수 변조 파형으로서 한주기 내에서 좌우 대칭 형태를 갖는 삼각파를 이용하는 경우에 대해, 브릴루앙 이득 분포의 시간과 공간에 따른 변화를 시뮬레이션 하고 정현파 변조의 경우와 비교해 보았다. 변조 파형 외의 다른 조건들은 그림 3의 경우와 동일하였다. 광주파수 offset이 $\nu_o = 0.90 \nu_B$



(a) 가상의 온도 분포

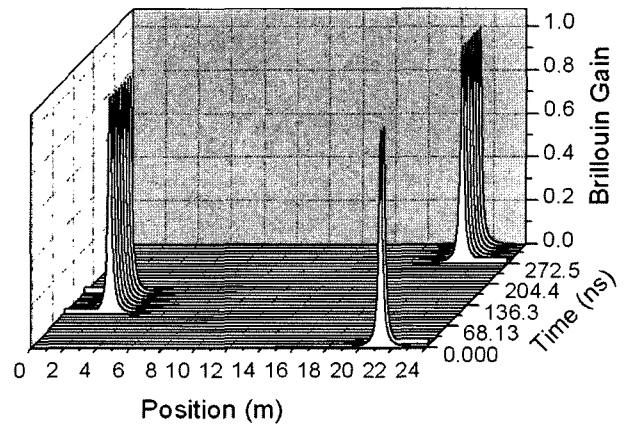


(b) 광주파수 offset과 계측 지점에 따른 프로브 출력 파워 분포의 시뮬레이션 결과.

그림 7. 시험 광섬유에 온도 분포가 존재하는 경우.

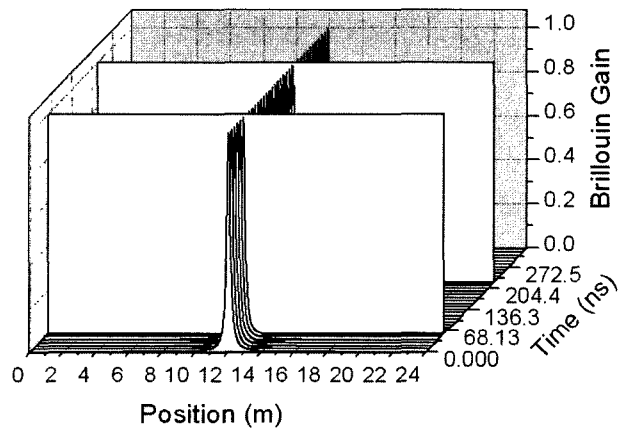
일 때와 $\nu_o = \nu_B$ 일 때 시간과 공간에 따른 브릴루앙 이득 분포의 변화를 한주기에 걸쳐 구하여, 그 결과를 그림 8에 나타내었다. 그림 8(a)는 광주파수 offset이 $\nu_o = 0.90\nu_B$ 인 경우, 즉, 브릴루앙 천이 주파수에서 벗어난 경우를 나타낸다. 반주기 동안 브릴루앙 이득 피크는 한 지점에 고정되지만 반주기 마다 이득 피크는 다른 지점으로 이동한다. 결과적으로, 한주기에 걸쳐 브릴루앙 이득 분포의 변화를 살펴보면 특정 지점에 이득 피크가 고정되지 않음을 알 수 있다. 그림 8(a)의 이득 분포를 시간 평균화할 경우 정현파와 마찬가지로 두 개의 작은 피크가 형성되며, 피크의 높이는 23% 만큼 감소하였다. 반면에, 그림 8(b)와 같이 광주파수 offset이 $\nu_o = \nu_B$

• $\nu_o = 0.90\nu_B$



(a) 광주파수 offset이 브릴루앙 천이 주파수와 일치하지 않는 경우.

• $\nu_o = \nu_B$



(b) 광주파수 offset이 브릴루앙 천이 주파수와 일치하는 경우.

그림 8. 삼각파로 광주파수 변조된 경우 한주기 동안 광섬유 내 브릴루앙 이득 분포의 시간과 공간에 따른 변화.

인 경우에는 브릴루앙 이득 피크가 고정되는 지점이 존재하며, 이는 그림 3(b)의 결과와 유사하다. 그러나 정현파의 경우와는 달리, 펌프와 프로브 빛이 항상 일정한 광주파수 기울기를 가지고 만나므로, 두 빛의 파형이 정확히 일치하는 순간을 제외한 나머지 모든 시간 동안 브릴루앙 이득 분포는 변함이 없음을 알 수 있다.

그림 9는 광주파수 offset이 브릴루앙 천이 주파수와 일치하는 경우 정현파와 삼각파 변조에 대해 시간 평균화된 브릴루앙 이득 분포를 비교한 것이다. 그림 9에서 볼 수 있듯이, 삼각파 변조의 경우 정현파 변조에 비해서 이득 분포의 선폭이 약간 좁음을 알 수 있다. 반치선폭으로 비교하면 약 10% 정도 좁아지는 것으로 나타났다. 그러나 이득 분포의 하단부의 퍼짐에 있어서는 상당한 차이가 있음을 볼 수 있다. 이는 삼각파로 변조하는 경우에 정현파 변조에 비해서 향상된 공간 분해능을 얻을 수 있음을 의미한다. 그러나 실제 실험에서는 삼각파로 광주파수 변조시 정현파에 비해 파형의 왜곡이 발생하기 쉬우므로, 정확한 변조 파형을 얻기 위해서는

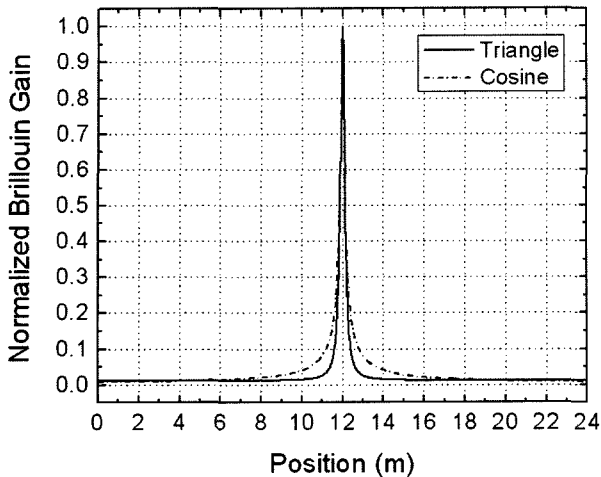


그림 9. 광주파수 offset이 브릴루앙 천이 주파수와 일치하는 경우에 정현파 변조와 삼각파 변조에 대한 시간 평균화된 브릴루앙 이득 분포의 비교.

파형의 왜곡 현상에 대한 보상이 필요할 것으로 생각된다. 기존의 주파수 영역에서 변조 파형을 다루는 시뮬레이션 기법을 삼각파에 적용할 경우, 단일 주파수 성분을 갖는 정현파에 비해 구성 주파수 성분이 매우 복잡하므로 시뮬레이션 과정이 매우 복잡해진다. 그러나 본 논문에서 제시한 시간 영역에서 변조 파형을 직접 다루는 시뮬레이션 기법의 경우 정현파와 마찬가지로 적용이 용이하였다.

V. 결 론

공간 선택적 브릴루앙 산란 방식의 명확한 이해와 응용을 위해 변조 파형을 시간 영역에서 직접 다루는 방식으로 시뮬레이션 기법을 제안하고 이를 수행하였다. 광주파수 변조된 펄프와 프로브 빛이 광섬유 내에서 중첩될 때 브릴루앙 이득 분포의 시간/공간적 변화를 구할 수 있었다. 펄프와 프로브 변조 파형 간의 광주파수 offset이 광섬유의 브릴루앙 천이 주파수와 일치할 때 광섬유 내 특정 지점에 지속적으로 브릴루앙 이득 피크가 존재하였고, 변조 주파수를 변화시킴으로써 이득 피크의 위치를 조절할 수 있었다. 광주파수 offset을 변화키면서 프로브 출력 파워의 변화를 측정하면 센서로서 분포형 계측이 가능함을 확인할 수 있었다. 시험 광섬유가 서로 다른 두 종류의 광섬유로 구성된 경우와 온도 분포가 존재하는 경우에 대해 시뮬레이션 하여 타당성 있는 결과를 얻을 수 있었다.

한편, 변조 파형으로서 정현파 대신에 삼각파를 이용하는 경우에 대해 시뮬레이션을 한 결과, 전반적인 양상은 정현파의 경우와 유사하나 정현파에 비해 공간 분해능 면에서 유리한 것으로 나타났다. 현재, 공간 분해능을 개선하고 측정 범위를 넓히기 위해 다양한 변조 파형에 대한 시뮬레이션 연구와 이를 실험적으로 구현하는 연구가 진행 중에 있다.

감사의 글

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었습니다. (KRF-2004-041-C00146)

참고문헌

- [1] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, (Academic Press, USA, 1995), pp. 370-384.
- [2] 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.
- [3] D. Curverhouse, F. Farahi, C. N. Pannell, and D. A. Jackson, "Stimulated Brillouin scattering: A means to realize tunable microwave generator of distributed temperature sensor," *Electron. Lett.*, vol. 25, no. 14, pp. 915-916, 1989.
- [4] 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.
- [5] T. Horiguchi, K. Shimizu, and T. Kurashima, "Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering," *J. Lightwave Technol.*, vol. 13, no. 7, pp. 1296-1302, 1995.
- [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] I. B. Kwon, C. Y. Kim, S. B. Cho, and J. J. Lee, "Temperature compensation of a strain sensing signal from a fiber optic Brillouin optical time domain analysis sensor," *J. Opt. Soc. Korea*, vol. 7, no. 2, pp. 106-112, 2003.
- [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, Ed., Proc. SPIE, vol. 4185, pp. 651-661, 2000.
- [12] K. Hotate and M. Tanaka, "Distributed fiber Brillouin strain sensing with 1-cm spatial resolution by correlation-based

- continuous-wave technique,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, no. 2, pp. 179-181, 2002.
- [13] 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.
- [14] D. Heiman, D. S. Hamilton, and R. W. Hellwarth, “Brillouin scattering measurements on optical glasses,” *Phys. Rev. B*, vol. 19, no. 12, pp. 6583-6592, 1979.

Simulation of Distributed Optical Fiber Sensors Using Spatially-Selective Brillouin Scattering

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

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

[†]*E-mail: hgpark@chonbuk.ac.kr*

(Received February 13, 2006, Revised manuscript April 4, 2006)

We implement numerical simulations for the distributed optical fiber sensor system that uses the spatially-selective Brillouin scattering, by treating the superposition of the optical-frequency-modulated pump/probe waves in the time domain. We obtain temporal and spatial distributions of Brillouin gain for various cases. Simulations are applied to the case of concatenated optical fibers of different kinds and the case of distributed temperature along the fiber, which give reasonable results for the distributed sensor. The result of using a triangular wave instead of a sinusoidal one as a modulation waveform shows that the triangular wave modulation has an advantage in spatial resolution.

OCIS Codes : 060.2370. 060.4080. 190.4370. 290.5830.