

수개의 종모드를 갖는 광원에 의한 고리형광섬유공진기에서의 유도브릴루앙산란*

이현재 · 윤병호 · 이동호 · 전영윤 · 김향균

한국전자통신연구소

(1995년 4월 17일 받음)

단일모드광섬유에서의 유도브릴루앙산란을 설명하고, 광원에 의한 기준신호 및 광섬유에서의 유도브릴루앙산란 신호를 이용해 헤테로다인 방식으로 주파수변화를 조사하였다. 수개의 종모드를 갖는 광원과 고리형 광섬유공진기를 결합하여 간단하게 스펙트럼분석기로 광섬유에서의 브릴루앙산란을 관측할 수 있다. 이 방법은 기준맥놀이 신호를 사용하기 때문에 13 GHz 영역에서의 주파수변화를 수 GHz의 낮은 영역에서의 주파수변화로 브릴루앙산란 신호를 볼 수 있다. 분산천이광섬유와 크래딩에 Ti 도핑된 광섬유 및 일반단일모드광섬유를 적절히 선택하여 13 GHz 영역에서의 주파수변화를 수 GHz 이하의 영역에서 주파수변화로 조사하니 각각 1.32 GHz, 900MHz 및 870 MHz였다.

I. 서 론

비선형현상에 대한 주된 연구목적은 비선형현상을 조절하고 이용하려는데 있다. 감지거나 신호분석에서 광섬유의 비선형현상을 이용하려는 노력이 최근까지는 무시되어 왔으나, 근래에는 많은 연구가 좀더 이러한 현상을 이해하고 이용하려는데 있다.

많은 광섬유 감지장치^[1]에서, 헤테로다인(heterodyne) 유도(carrier) 주파수로 광정보를 전자적 복조에 이용하려고 하고 있다. 음향광학적 브라그(Bragg)셀은 광섬유 응용기술에 적합하지는 않지만 전통적으로 음향광학변조기(acousto-optic modulator)로 사용하여 40, 80 MHz의 주파수를 생성 사용하였다. 광섬유에서 주파수를 이동시키는 방법으로는 복굴절이 큰 광섬유에서 편극 빛살들 사이의 결합^[2], 광섬유의 공간모드들 사이의 결합^[3], 광섬유 표면에서 진행되는 음향파를 이용하여^[4] 주파수를 이동시키는 방법 등이 개발되었다. 그러나 음향광학적 브라그셀은 제작이 어렵고 수 W의 전기적 입력이 요구되며, 광섬유에 이용하려면 기계적으로 꾸미기가 어렵다.

광섬유에서의 유도브릴루앙 산란특성과 고리형 광섬유공진기를 결합하여 주파수를 조절할 수 있는 주파수 이동기가 개발되었으나^[5] 기준주파수가 없어서 실제 이

동주파수를 알아내는데 어려움이 있으며, 유도브릴루앙산란에 의한 주파수 이동이 수십 GHz 영역에서 일어나기 때문에 신호를 측정하는데 어려움이 있다.

유도브릴루앙 산란현상은 비선형 효과로 펌프 신호와 광학적으로 유도된 음향 포논(phonon)의 작용이 포함되어 있으며, 주파수는 아래로 이동(down shifted)되며 신호는 입사 빛살이 진행되는 방향의 반대방향으로 도파된다.

이 논문에서는 단일모드 광섬유에서의 유도브릴루앙산란을 설명하고, 유도브릴루앙산란 신호를 헤테로다인 방법으로 측정하는 방법을 설명하였다. 실험적 결과로 수개의 종모드를 갖는 광원과 고리형 광섬유공진기를 결합하여 간단하게 RF(radio frequency) 스펙트럼분석기로 광섬유에서의 브릴루앙산란 신호를 조사하였다. 또한 수십 GHz 영역에서의 작은양의 주파수 변화를 수 GHz의 낮은 영역에서의 주파수변화로 측정할 수 있는 장치를 구성하여 분산천이광섬유(dispersion shifted fiber)와, 크래딩에 Ti 도핑된 광섬유 및 단일모드광섬유로 유도브릴루앙 산란주파수 신호를 수십 GHz 및 수 GHz 이하에서 볼 수 있었다.

II. 고리형 광섬유공진기

고리형 광섬유공진기에서 유도브릴루앙산란 주파수 신호의 생성은 광섬유고리에서 빛살의 손실이 적어야

*이 논문은 HAN-BISDN 과제에 일환으로 수행된 것입니다. 연구수행을 위해 지원과 도움을 주신 이만섭부장과 박창수실장께 감사드립니다.

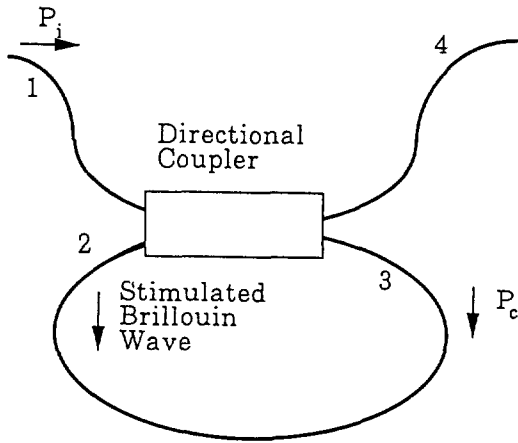


그림 1. 고리형 광섬유공진기
 P_c : 회전하는 펄프빛살의 세기, P_i : 입사빛살의 세기

낮은 임계 빛살세기에서도 가능하다. 높은 피네스(finesse)를 갖는 고리형 광섬유공진기는 회전하는 펄프빛을 증가시키는데 중요한 역할을 할뿐 만 아니라 고리형 광섬유공진기에서 펄프 빛이 브릴루앙산란 신호를 발생시키는데 필요한 임계빛살의 세기를 감소시킨다.

L.F. Stokes etc.^[8] 등이 스러지는 들(evanescent field)을 이용한 조절가능한 광섬유 결합기를 이용해 고리형 광섬유공진기의 특성을 조사하였다. 그림 1에서 입사된 펄프광은 고리형광섬유공진기에서 총위상이동의 합이 2π 의 정수배이면 공진을 일으킬 것이다. 손실에 의존되는 결합계수를 최대값으로 조절하면 회전하는 펄프빛살의 세기는 입사하는 빛살의 세기와 고리형 광섬유공진기에서 소모되는 빛살의 세기와 같을 때까지 증가하게 된다. 공진결합계수 K 는 아래와 같이 주어진다.

$$K = (1 - \gamma_0) \exp(-2\alpha_0 L) \tag{1}$$

γ_0 는 광커플러에서 빛살의 결합세기 손실이고, α_0 는 고리에서의 진폭감쇄계수이고, L 은 광섬유공진기의 길이이다. 고리공진기 3에 존재하는 회전하는 펄프빛살의 세기 P_c 는 입사빛살의 세기 P_i 와 다음과 같은 관계가 있다.

$$P_c/P_i = (1 - \gamma_0)/(1 - K) \tag{2}$$

광섬유공진기에서 피네스 f 는 아래와같이 주어진다.

$$f = \pi(K)^{1/2}/(1 - K) \tag{3}$$

결합계수 K 를 조절하는 것에 의해 광섬유 4의 끝에서의

출력을 0으로 조절할 수 있다.

만일 회전하는 펄프 빛살의 세기가 유도브릴루앙산란 신호의 임계 발진 빛살의 세기보다 크다면 후방으로 진행하는 브릴루앙산란 신호는 입사빛살이 진행하는 빛살의 반대방향으로 레일레이 산란 신호와같이 회전할 것이다. 펄프광 주파수가 광섬유고리의 공진조건에 맞는다면 브릴루앙 이득 근처의 공진모드는 자동적으로 존재하며 동시에 공진하는 브릴루앙산란 신호가 존재할 것이다. 그렇게 되면 빛살이 입사된 1번 광섬유로 유도브릴루앙산란 빛살이 나올 것이다.

III. 수개의 종모드를 갖는 레이저 광원과 유도브릴루앙산란주파수 신호사이의 맥놀이(beatng)

유도브릴루앙산란 신호를 관측하기 위해서는 먼저 빛살의 세기가 크고 선포이 작은 펄프빛살, 비선형계수가 큰 재료 또는 비선형계수가 작더라도 비선형이 일어나는 경로가 길며 도파로와 같이 고밀도의 빛살이 도파할 수 있어야 하며, 도파손실이 작아야 한다. 단일모드광섬유는 비선형계수는 작더라도 이러한 조건을 갖추고 있다. 즉 세기가 크고 선포이 좁은 펄프빛살이 광섬유를 진행하면서 음향파를 발생시켜 궁극적으로는 광섬유의 굴절률을 변화시킨다. 광섬유에서 굴절률변화는 하나의 주기적인 굴절률 격자를 만들어 브라그회절격자와 같이 펄프빛살을 산란 시킨다. 산란된 빛살은 발생된 음향파에 실려 움직이므로 도플러효과에 의해 주파수가 아래로이동(down shift) 된다. 유도브릴루앙산란신호가 발생하는 원인은 결국 펄프빛살과 음향파 사이의 상호작용에 의하여 새로운 스투스파를 생성하는 것이다.

높은 감도를 가지면서 조그마한 주파수 이동을 조사하는 적절한 방법은 광헤테로다인 방식이다. 광헤테로다인 방식으로 단일주파수를 갖는 광원을 가지고 브릴루앙산란을 조사하는 경우, 펄프빛살로 단일주파수의 빛살을 사용하기 때문에 펄프빛살에 의해 생성된 스투스파와 펄프빛살 사이의 광주파수차이 때문에 맥놀이 신호가 생긴다. 이 경우 맥놀이 주파수는 브릴루앙산란 주파수 신호와 같다. 다시말해 펄프빛살과 스투스파 사이의 주파수 차이는 ν_0 인데 이는 브릴루앙산란주파수로 펄프빛살의 주파수에 비해 아래로 ν_0 만큼 이동된다^[8]

$$\nu_0 = 2nVa/\lambda \sin(\theta/2) \tag{4}$$

여기서 n 은 굴절률이고, Va 는 음파의 속도이고, λ 는 펄프파장이고, θ 는 산란각이다. 단일모드광섬유에서 유도브릴루앙산란에 의한 주파수 이동^[7]은, 1319 nm 파장에

서 매치드(matched) 크래딩 광섬유인 경우는 ~13.00 GHz, 디프래스트크래딩광섬유인 경우에는 ~12.81과 ~12.83 GHz이고, 분산이동 광섬유인 경우는 ~12.38 GHz 정도이다. 이 주파수는 너무 높기 때문에 신호처리 (processing)에 적용하기가 어렵다. 디프래스트 크래딩 광섬유의 경우 두개의 피크 신호는 코아내 도핑재료의 비균일성에 의한 것이다. 브릴루앙산란 주파수이동은 코아내 첨가물질의 농도에 따라 다르며, GeO₂량이 많아질 수록 감소한다. 이득선폭은 두꺼운 유리의 경우 ~17 MHz 정도이나 광섬유에서는 좀 더 큰 100 MHz까지 관찰 되었다.^[9]

수개의 종모드를 갖는 광원에서 종모드 사이의 주파수 차이에 의한 맥놀이파는 기준주파수로 사용이 가능하다. 동일 공진기에서 생성되는 수개의 종모드를 갖는 레이저 빛살은 맥놀이 주파수가 매우 안정하다. 또한 수개의 종모드중 가장 세기가 큰 종모드 빛살은 펄프빛살로 작용하여 스톱스파를 형성하고 펄프빛살은 스톱스파와의 광주파수차이로 인하여 맥놀이 신호가 생성된다. 이 맥놀이 신호는 브릴루앙산란 주파수와 동일하다. 스톱스파와 펄프레이저의 종모드 중 한 개 사이에서 생긴 새로운 맥놀이 주파수는 아래와 같이 주어진다.

$$\Delta\nu = A - 2nVa/\lambda \sin(\theta/2) \quad (5)$$

LD로 펄프된 YAG레이저(Amoco laser co.)의 경우, 파장은 1319 nm이고, 종모드의 선폭은 ~5 kHz이고, 종모드들 사이의 맥놀이 주파수 A는 그림 2에 나타난 바와 같이 13.7 GHz이고, 수개의 종모드를 갖는 광원과 고리형광섬유공진기를 결합하여 브릴루앙산란 신호를 생성시키는 방법으로 광주파수를 광섬유 종류에 따라 870, 900, 1300 MHz 영역으로의 주파수 이동시키는 것이 가능하다. 또한 고리형 광섬유공진기에 온도를 변화시킴

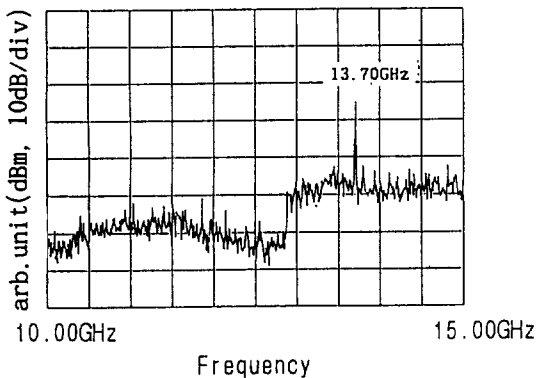


그림 2. 광원(종모드사이)에 의한 맥놀이 신호

으로서 연속적으로 주파수를 조절할 수 있을 것이다.^[5] 결과적으로 사용하는 광섬유에 따라 불연속적으로 브릴루앙산란주파수의 조절이 가능하고, 또한 온도를 조정하면 연속적으로 브릴루앙산란 주파수를 조절할 수 있고, 고리형 광섬유공진기에서의 주파수 이동은 단지 공진기의 온도를 변화시키는 것으로 가능할 것이다. 이러한 방식의 장점은 수십 km의 긴 광섬유에서 유도브릴루앙산란을 생성하는 것에 비해서, 짧은 광섬유 길이 및 낮은 광세기로 고리형 광섬유공진기에서 유도브릴루앙산란 신호를 생성할 수 있다.

IV. 실험장치 및 방법

수개의 종모드를 갖는 광원(Amoco laser co.), 광감쇄기, 방향성결합기(50 : 50), 감지기, RF스펙트럼분석기, 광섬유, 고리형광섬유 공진기 등으로 그림 3과 같이 실험장치를 구성하였다. 레이저 광원에서 나오는 빛살을 고리형 광섬유공진기에 입사시켰다. 광섬유 공진기의 길이는 ~10 km를 사용하였으며, 공진기의 자유분광 영역(free spectral range)는 ~20.8 kHz 정도로 브릴루앙산란 이득선폭 17~100 MHz 보다 적다.^[9] 광섬유를 통하여 투과된 빛살과 반사된 빛살을 분해능이 좋은 감지기를 사용하여 종모드 사이의 맥놀이 신호를 기준신호로 사용하여 브릴루앙산란 신호를 분석하였다. 광감쇄기는 레이저 빛살의 세기를 조정하여 광섬유에서 브릴루앙산란 신호가 생성되는 임계 빛살의 세기를 알기 위하여 사용하였다. 방향성결합기1은 분파비가 50 : 50으로 고리형 광섬유공진기에서 빛살의 진행방향에 대해 반대방향으로 나오는 브릴루앙산란 신호 빛살의 세기를 조사하기 위해 사용하였다. 방향성 결함기2는 분파비가 50 : 50으로 고리형 광섬유공진기를 구성하기 위해 사용하였다. 고리형 광섬유공진기에서 입사빛살의 세기가 유도브릴루앙 산란 신호의 임계빛살세기 이상이면 브릴루앙산란 신호가 생성되어 입사빛살이 진행되는 방향의 반대방향으로 진행하여 방향성 결함기 2를 거쳐 방향성 결함기 1를 통해 감지기 및 RF스펙트럼분석기로 브릴루앙산란 신호를 볼 수 있다. RF스펙트럼분석기로 신호를 관측할 때 수개의 종모드가 있는 광원을 사용하기 때문에 브릴루앙산란신호와 종모드 사이의 맥놀이 신호가 스펙트럼분석기에 동시에 나타난다. 이때에 특별한 장치를 사용하지 않았기 때문에 브릴루앙 신호는 연속적으로 나타나지 않으며, 공진기의 길이 변화를 이용하여 스펙트럼분석기로 관측하였다. 스톱스파와 펄프레이저의 종모드 중 한개사이에 맥놀이 신호가 발생하여 더 낮은

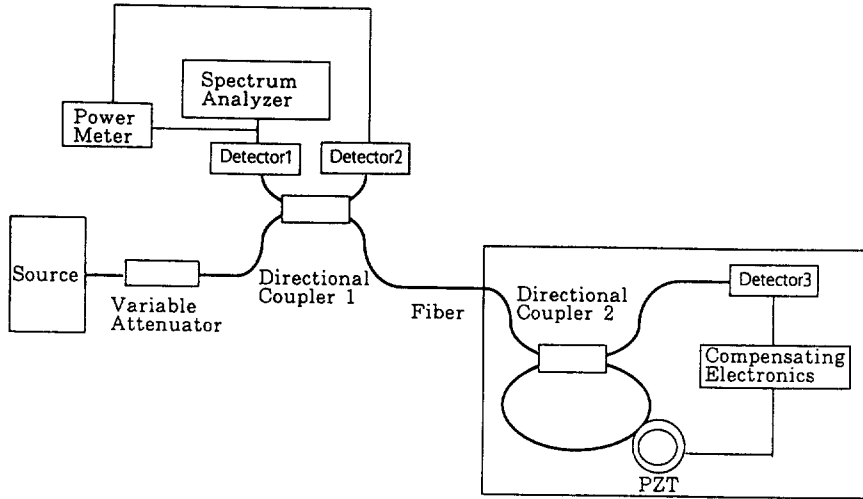


그림 3. 수 개의 종모드를 갖는 고리형광섬유공진기를 이용한 유도브리루앙산란 측정장치

주파수 영역에서 브릴루앙 신호를 볼 수 있다. 이 경우 레이저 종모드들에 의한 기준 맥놀이 신호는 고정되어 나타나고, 광섬유에서의 브릴루앙 산란신호는 광섬유에 가해지는 압력이나 온도변화에 의해 주파수가 변화하게 된다. 온도조절장치를 이용하여 고리형 광섬유공진기에 온도를 가하면 주파수 이동을 볼 수 있을 것이다. 감지기 1은 광섬유에서의 유도브리루앙 신호 및 레이저 광원의 맥놀이 신호를 분석하는데 사용하고 감지기 3은 고리형 광섬유공진기에서 나오는 빛살의 세기를 조사하기 위하여 사용한다.

V. 결과 및 논의

수개의 종모드를 갖는 광원에서 종모드 사이의 주파수 차이에 의한 맥놀이파를 기준주파수로 사용하고, 종모드 사이에 최대세기를 갖는 모드빛살을 펄프빛살로 하여 고리형광섬유공진기에서 생성된 스톱스파 즉, 유도브리루앙산란 신호의 특성을 광헤테로다인 방식을 적용하여 조사하였다. 펄프빛살은 스톱스파와의 주파수차이로 인하여 맥놀이 신호가 생성된다. 이 맥놀이 신호는 브릴루앙 산란 주파수와 동일하다.

그림 4는 광감쇄기를 써서 입사빛살의 광세기를 서서히 감쇄시키면서 후방으로 산란되어 나오는 빛살의 세기변화를 광검출기로 조사한 것이다. 빛살을 감쇄시키지 않았을 때 15.6 dBm의 빛살을 광감쇄기로 서서히 감쇄시켜 6.6 dBm(그림에서 9 dB 정도감쇄) 근처가 되면 후방산란되어 나오는 빛살의 기울기가 변화되는 것을 볼 수 있다. 즉 입사 빛살이 수 mW 이상일 때 유도브리루앙

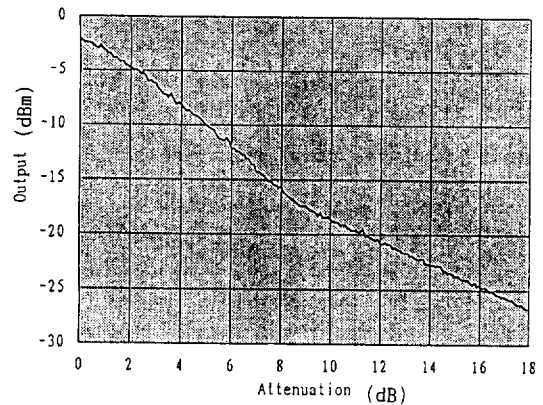


그림 4. 입사빛살의 세기변화에 따른 뒷쪽으로 산란되어 나오는 빛살의 세기변화

산란 신호가 발생되는 것을 알 수있다. 이 빛살이 유도브리루앙산란 신호인지를 확인하기 위하여 RF스펙트럼 분석기로 입사 빛살을 조사하니 13.7 GHz에서 그림 2와 같이 맥놀이 신호가 나타나는 것을 확인하였다. 이는 레이저 빛살의 종모드들 사이의 맥놀이 현상이다.

광감쇄기를 써서 입사 빛살의 세기를 변화 시키면서 유도브리루앙산란 신호의 주파수 이동을 RF스펙트럼분석기로 확인하니 광섬유의 종류에 따라 다르다는 것을 확인하였다. 식 4에 따르면 매질에서의 음파의 속도, 매질의 굴절율 및 산란각 등이 조금씩 다른 광섬유를 사용하면 브릴루앙산란 주파수가 다르다는 것을 알 수 있다. 그림 5-a,b,c는 각각 분산천이광섬유, 크래딩에 Ti-도핑된 광섬유, 단일모드광섬유 등에 관한 것으로 각각의

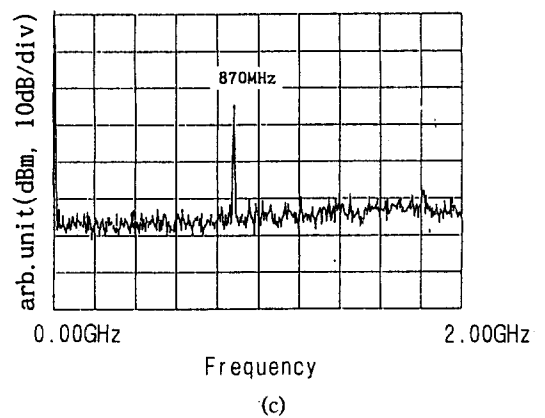
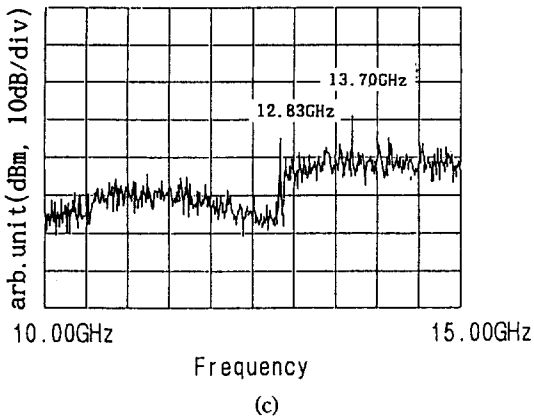
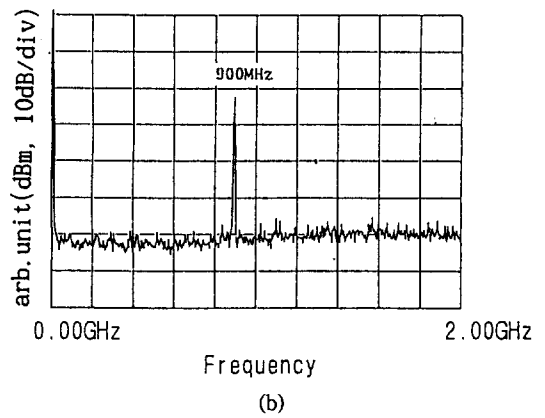
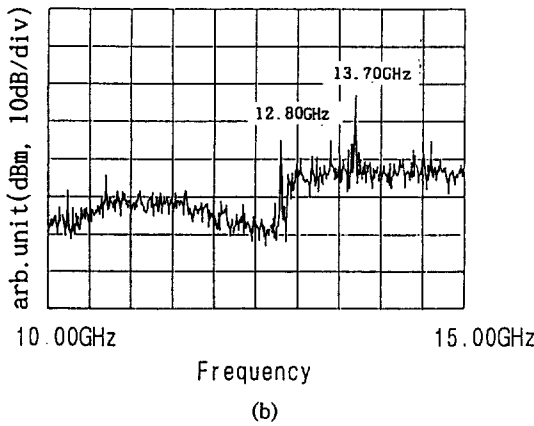
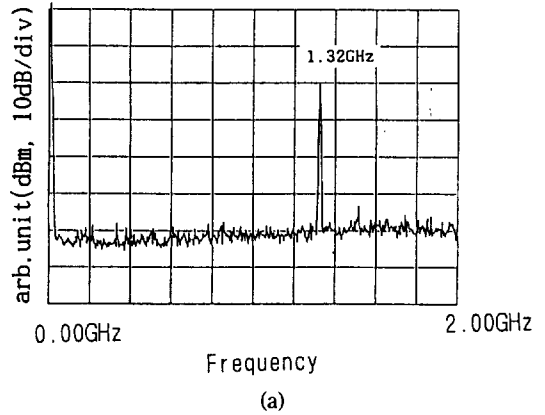
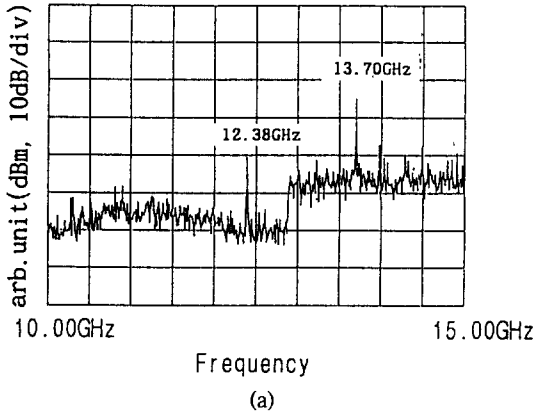


그림 5. 기준맥놀이 신호와 유도브릴루앙산란 신호
 a) 분산천이광섬유
 b) 크래딩에 Ti가 도핑된 광섬유
 c) 일반단일모드광섬유

그림 6. 스톡스파와 펌프레이저 종모드중 한개사이의 맥놀이신호
 a) 분산천이광섬유
 b) 크래딩에 Ti가 도핑된 광섬유
 c) 일반단일모드광섬유

주파수 이동은 분산천이광섬유의 경우 12.38 GHz 정도 이고, 크래딩에 Ti-도핑된 광섬유의 경우는 12.80 GHz 정도이고, 일반단일모드 광섬유의 경우는 12.83 GHz 정

도이다.

그림 6-a,b,c는, 스톡스파와 펌프레이저의 종모드중 한

개 사이에서 생긴 맥놀이 신호를 각각의 광섬유에 대해 나타낸 것이다. a는 분산천이광섬유의 경우이고, b는 Ti-도핑된 광섬유의 경우이고, c는 일반단일모드광섬유의 경우이다. 이 경우 기준신호주파수와 펌프빛살 및 브릴루앙산란 주파수 차이에 의한 맥놀이 주파수 차이에 의한 결과로서 식 (5)의 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 즉 분산천이광섬유의 경우는 1.32 GHz이고, 크래딩에 Ti-도핑된 광섬유의 경우는 900 MHz 이고, 일반 단일모드 광섬유의 경우는 870 MHz이다.

RF스펙트럼분석기로 브릴루앙산란 신호를 관측할 때 수개의 종모드를 갖고 있는 광원을 사용하기 때문에 유도브릴루앙 산란 신호와 종모드 사이의 맥놀이 신호가 스펙트럼분석기에 동시에 나타난다. 이들 두개의 맥놀이 신호 사이에 다시 맥놀이 신호가 발생하여 더 낮은 주파수 영역에서 맥놀이 신호를 통해 유도브릴루앙산란 신호를 볼 수 있다. 이 경우 기준맥놀이신호 즉 레이저 종모드를 통해 나오는 신호는 고정되어 나타나고, 온도 조절장치를 이용하여 고리형광섬유공진기에 온도를 가하면 주파수가 이동되는 것을 볼 수 있다.^[5]

VI. 결 론

단일모드광섬유에서 유도브릴루앙산란현상을 이론적으로 검토하고, 광섬유에서 생성된 유도브릴루앙산란 신호를 광헤테로다인방식을 이용하여 측정하는 방법대해 설명하였다. 수개의 종모드를 갖는 광원과 고리형 광섬유공진기를 결합하여 간단하게 RF스펙트럼분석기로 광섬유에서의 브릴루앙산란신호를 조사하였다. 또한 레이저 광원의 종모드들에 의한 기준맥놀이주파수를 이용하여 수십 GHz에서의 작은양의 주파수 변화를 수 GHz의 낮은 영역에서의 주파수변화로 측정할 수 있는 장치를 구성하였다. 분산천이광섬유와, 크래딩에 Ti가 도핑된 광섬유 및 일반단일모드광섬유에서 브릴루앙산란 신호를

조사한 결과 각각 12.38 GHz, 12.80 GHz 및 12.83 GHz였다. 기준맥놀이주파수를 이용하여 낮은 주파수 영역에서 맥놀이 주파수를 조사하니 각각 1.32 GHz, 900 MHz 및 870 MHz였다.

이 장치를 이용하면 광섬유에서의 유도브릴루앙산란에 의한 주파수 이동을 수십 GHz 영역에서 뿐만 아니라 수 GHz 이하에서 측정이 가능하기 때문에 유도브릴루앙산란특성을 쉽게 조사할 수 있으며, 주파수변화를 조절할 수 있는 주파수이동기 개발이 가능하며, 또한 기준주파수가 있어서 실제 이동주파수를 알아내는데 어려움이 없을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] D. A. Jackson, J. Phys E **18**, 981(1985).
- [2] C. J. Duffy, R. P. Tatam, Electron Lett **27**, 2005 (1989), Appl Opts **32**, 5966(1993).
- [3] B. Y. Kim, J. N. Blake, H. E. Engan, and H. J. Shaw, Opt lett **11**, 389(1986).
- [4] P. A. Greenhalgh, A. P. Foord, and P. A. Davis, Electron Lett, **25**, 1207(1989).
- [5] Yoh. Imai and Noriaki Shimada, Fifth Optoelectronics Conference (OEC '94) 246(1994).
- [6] K. Kail, D. O. Culverhouse, and D. A. Jackson, Opt Lett **16**, 1539(1991).
- [7] R. W. Tkach, A. R. Chraplyvy and R. M. Derosior, Electron Lett **22**, 1011(1989).
- [8] L. F. Stokes, M. Chodorow and H. J. Shaw, Opt Lett **7**, 509(1982).
- [9] Y. Azuma, N. Shibata, T. Horiguchi, and M. Tateda, Electron Lett **24**, 250(1988) N. L. Rowell, P. J. Thomas, H. M. van Driel, and G. I. Stegeman, Appl. Phys. Lett **21**, 539(1972)

Stimulated Brillouin scattering using a source with a few axial modes and an optical fiber ring resonator

Hyunjae Lee, Byeong-ho Yoon, D.H. Lee, Young Yun Chun and H.G. Kim
*Electrics and Telecommunications Research Institute, Lightwave Communications Section,
Taejon 305-600, Korea*

(Received: April 17, 1995)

Stimulated Brillouin scattering theory is described in an optical fiber. Frequency change with an optical heterodyne method is analyzed between reference signal of a source and stimulated Brillouin scattering signal in an optical fiber. By coupling a source with a few axial modes and an optical fiber ring resonator, Brillouin scattering is studied with a spectrum analyzer. Using reference beating signal of a source, we have reduced the Brillouin beating frequency from 13 GHz range to below GHz. Experimentally, we can see the Brillouin beating frequency from 13 GHz range to below GHz with a dispersion shifted fiber (1.32 GHz), Ti-doped fiber (900 MHz) and single mode optical fiber (870 MHz).