

이중 공진 고리 간섭계 (double resonant ring interferometer)

최 세철, 이 인재, 양 진성, 문 희중, 김 영덕

서강대학교 물리학과

오 문수

대전 기계장

초 목

홀 겐모양(single mode) 광섬유로 조절 가능한 공진 짝짓기(tunable directional coupler)를 제작해 이중 공진 고리 간섭계(double resonant ring interferometer)를 구성했다. 이중 공진 고리 간섭계에 PZT(piezoelectric transducer)와 스피커를 각각 부착해서 위상 변조(phase modulation)를 동시에 시켜 나오는 출력 신호가 전산 시뮬레이션(computer simulation)을 통해 얻은 결과와 일치함을 보았으며, 이 출력 신호를 FFT(Fast Fourier Transformation)를 써서 분석했다. 이 결과로부터 동시에 두 가지 외부 변화를 감지할 수 있는지를 조사했다.

1. 서 론

최근 광섬유를 이용한 많은 종류의 간섭식 감지기(interferometric fiber sensor)^{1,2}들이 개발되었다. 이 중에서도 공진 고리 간섭계(resonant ring interferometer)³는 다른 간섭계(Fabry-Perot, Michelson, Mach-Zehnder 등)보다 동일한 위상 변조에 대해 안정하며 감지 능력이 뛰어나 넓은 분야에 응용될 수 있다. 즉, 온도, 4° 음향 등의 변화에 대해 민감하게 반응하며 여러가지 전기적인 장치들과 결합해 외부 섭동의 증감 방향도 찾아낼 수 있다.

광섬유 공진 고리 간섭계를 구성하는데 필요한 소자는 공진 짝짓기(directional coupler)⁴⁻⁷인데 이것은 두개의 인접한 광섬유 사이에서 소멸되는 들(evanescent field)을 겹치게 하여 빛살을 가뜨거나 합성할 수 있는 장치이다. 공진 짝짓기를 써서 광섬유 공진 고리 간섭계를 여러 개 구성해 동시에 여러가지 외부 섭동을 감지할 수 있는 다중 감지기(multi-sensor)⁸에 대한 연구가 최근 많이 행해지고 있다. 다중 감지기는 화학공장이나 발전소에서 동시에 여러가지 다양한 측정(온도, 압력, 진동 등)을 하는 데에 응용될 수 있다.

광섬유를 이용한 다중화(multiplexing)장치는 여태까지 잘 알려진 전기적인 다중화 장치보다 몇 가지 장점이 있다. 첫째, 광

섬유 자체의 넓은 투과폭(transmission bandwidth) 때문에 많은 수의 감지기를 동시에 구성할 수 있으며, 물체는 전기적인 능동 소자없이 수동으로 작동할 수 있다는 점이다. 즉, 전자기 간섭(electro-magnetic interference; EMI)에 대한 낮은 고유의 자화율(low intrinsic susceptibility)을 가지고 있다.

이 논문에서는 홀겐모양(single mode) 광섬유로 공진 짝짓기를 제작해 다중 감지기로서 이중 공진 고리 간섭계를 구성하고, 각각의 감지 고리에 변조신호를 동시에 가해 나오는 출력을 조사하였다. 또한 단일 공진 고리 간섭계에 두 개의 변조신호를 감지 고리에 동시에 가해 나오는 출력 신호를 이중 공진 고리 간섭계의 출력 신호와 비교했다. 또한 이 두 장치에서 나오는 출력 신호를 FFT(Fast Fourier Transformation)를 통해 분석해 주파수 분포에 따른 출력세기(Intensity)를 조사하였다.

2. 이 론

(1) 홀겐모양 광섬유 공진 고리 간섭계(single mode fiber-optic resonant ring interferometer)

홀겐모양 광섬유를 써서 만든 공진 짝짓기를 사용하여 그림 1과 같이 단일 공진 고리 간섭계를 구성하였다. 한쪽 입력 (1)로 입사되는 빛살은 짝짓기를 통하여 나누어져서 한쪽 빛살은 (3)으로 투과되어 고리를 통하여 (2)에 도달하고, 다른 한쪽 빛살은 (4)로 짝짓기를 통하여 넘어가게 된다. (2)에 도달한 빛은 같은 쪽으로 투과하거나 다시 다른 쪽으로 넘어가게 된다. 이렇게 하여 투과된 빛살은 다중 빛살 간섭(multiple beam interference)과 같은 간섭을 일으킨다. 공진 짝짓기 자체의 손실을 γ_0 라 하고, x 를 결합계수(coupling coefficient)라 하면, 출력쪽 (4)에서 나오는 빛살의 상대적 세기는 다음과 같이 표현된다.³

$$\left| \frac{E_4}{E_1} \right|^2 = (1 - \gamma_0) \left(1 - \frac{\frac{(1-x)^2}{(1+x)^2}}{1 - \frac{4x}{(1+x) \sin \theta/2}} \right) - (1)$$

이 식의 마지막 항에 $\frac{1}{1-x} \approx 1+x$ ($x \ll 1$)의 근

사를 취하고 $\sin^2 \theta/2 = (1 - \cos \theta)/2$; $\theta = nL\omega_0/c - \pi/2$ 의 관계식을 이용하면 입사된 빛살과 투과된 빛살의 상대적 세기 1은

다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I = \left| \frac{E_d}{E_i} \right|^2 = A + B \cdot \sin \beta L \quad (\beta = n\omega_0/c) \quad \text{--- (2)}$$

$$\begin{cases} A = (1 - \gamma_0) \left(1 - \frac{(1-x)^2}{(1+x)^2} + \frac{2x(1-x)^2}{(1+x)^2} \right) \\ B = (1 - \gamma_0) \frac{2x(1-x)^2}{(1+x)^4} \end{cases} \quad \text{--- (3)}$$

여기서 β 는 광섬유 내에서 도파되는 빛살의 전파상수(propagation constant)이다.

이제 공진 고리 간섭계에 어떠한 주기적인 변조신호를 가하면 단일 공진 고리 간섭계를 통해서 나오는 빛살의 상대적 세기 I 는 다음과 같이 표현된다.

$$I = A + B \sin(a \sin \omega_1 t + \phi) \quad \text{--- (4)}$$

그런데 동시에 감지 고리의 두 곳에서 각각 변조신호를 가했을 때 식 (4)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I = A + B \sin(a \sin \omega_1 t + b \sin \omega_2 t + \phi) \quad \text{--- (5)}$$

여기서 ϕ 는 초기 위상이다. 식 (5)를 Bessel 함수로 전개시켜 정리하면 다음과 같다. ($n \leq 2$)

$$\begin{aligned} I = & A + B \sin \phi [J_0(a)J_0(b) + 2J_2(a)J_2(b) \cos 2\omega_2 t \\ & + 2J_0(b)J_2(a) \cos 2\omega_1 t \\ & + 2J_1(a)J_1(b) \{\cos(\omega_1 + \omega_2)t - \cos(\omega_1 - \omega_2)t\}] \\ & + B \cos \phi [2J_0(b)J_1(a) + J_0(a)J_1(b)] \sin \omega_1 t \\ & + 2J_1(a)J_2(b) \{\sin(\omega_1 + 2\omega_2)t + \sin(\omega_1 - 2\omega_2)t\} \\ & + 2J_2(a)J_1(b) \{\sin(\omega_2 + 2\omega_1)t + \sin(\omega_2 - 2\omega_1)t\} \end{aligned} \quad \text{--- (6)}$$

이것은 단일 공진 고리 간섭계의 동시 위상 변조시 나타나는 출력의 주파수 분포를 표현한 식이다.

(2) 이중 공진 고리 간섭계 (double resonant ring interferometer)

아래의 그림 2 와 같이 공진 고리 간섭계 N 개를 직렬로 연결한 경우 빛살의 상대적 세기는 각각의 고리에서 나오는 빛살의 상대적 세기를 곱한 값이 된다.⁹

$$\text{즉, } \left(\frac{I_{out}}{I_{in}} \right)_N = \prod_{i=1}^N \left(\frac{I_{out}}{I_{in}} \right)_1 \prod_{i=1}^{N-1} \exp(-2\alpha_0 L_i) \quad \text{--- (7)}$$

여기서 L_i 는 i 번째 고리의 길이를 나타내며 α_0 는 진폭 감쇠 계수이다. 단일 공진 고리 간섭계와 마찬가지로 $\alpha_0 L_i \ll 1$ 이므로, $\exp(-2\alpha_0 L_i) \approx 1$ 이 된다.

그러므로,

$$\left(\frac{I_{out}}{I_{in}} \right)_N = \prod_{i=1}^N \left(\frac{I_{out}}{I_{in}} \right)_1 \quad \text{--- (8)}$$

이제 이중 공진 고리 간섭계를 고려하자. 공진 고리 간섭계의 각각의 고리에서 나오는 빛살의 상대적 세기를 I_1, I_2 라 할 때, 두 공진 고리 간섭계를 통과하여 나온 빛살의 상대적 세기 I 는 N 개의 경우와 마찬가지로 I_1 과 I_2 를 곱한 값이 된다.

$$\text{즉, } I = I_1 \times I_2 \quad \text{--- (9)}$$

식 (2)에 의해 $I_1 = A + B \sin \beta L_1, I_2 = C + D \sin \beta L_2$ 라 하면

$$I = (A + B \sin \beta L_1) (C + D \sin \beta L_2) \quad \text{--- (10)}$$

이 된다.

$$I_1 = A + B \sin(a \sin \omega_1 t) \quad \text{--- (11)}$$

$$I_2 = C + D \sin(b \sin \omega_2 t + \phi) \quad \text{--- (12)}$$

여기서 ϕ 는 두 고리 간섭계 사이의 위상차를 말한다. 즉,

$$I = I_1 \times I_2$$

$$= [A+B \sin(a \sin \omega_1 t)] [C + D \sin(b \sin \omega_2 t + \phi)] \quad \text{--- (13)}$$

이 된다. 이것을 Bessel 함수로 전개시켜 정리하면,

$$\begin{aligned} I = & A + C J_0(b) \cdot \sin \phi + [2B J_1(a) \\ & + 2D J_0(b) J_1(a) \sin \phi] \sin \omega_1 t \\ & + 2C J_1(b) \cdot \cos \phi \sin \omega_2 t + 2C J_2(b) \cdot \sin \phi \cos 2\omega_2 t \\ & + 2D J_1(a) J_2(b) \cdot \cos \phi [\cos(\omega_1 - \omega_2)t - \cos(\omega_1 + \omega_2)t] \\ & + 2D J_1(a) J_2(b) \cdot \sin \phi [\sin(\omega_1 + 2\omega_2)t + \sin(\omega_1 - 2\omega_2)t] \end{aligned} \quad \text{--- (14)}$$

가 된다. 즉, 이중 공진 고리 간섭계의 각각에 ω_1, ω_2 의 주파수로 위상 변조시켜서 나온 출력은 여러 가지의 주파수가 합성된 것임을 나타내고 있다. 이렇게 합성된 신호는 Fourier 변환을 통해 빛살의 상대적 세기의 주파수 분포를 알 수 있다.

III. 실험 장치 및 방법

1) 공진 칩셋계의 제작과 공진 고리 간섭계의 구성

이 실험에서는 기계적 연마 방법으로 공진 칩셋계를 제작했다. 제작된 공진 칩셋계는 광섬유의 덧껍질(cladding)을 갈아내어 충분히 인접시킴으로서 스러지는 들이 집히는 것을 이용한 것이다. 공진 칩셋계는 빛살을 나누어 주거나 두 빛살을 합하여 주는 역할을 한다. 공진 칩셋계 제작시 사용된 광섬유는 중심의 굴절률이 1.4625, 덧껍질의 굴절률이 1.4585 이고, 지름은 중심이 4.7 μm , 덧껍질이 100 μm 이며, 6328 \AA 의 파장을 가진 빛살에 대해 홀궤모양으로 전파되며, 전파손실률은 9 dB/Km 이다. 이렇게 제작된 공진 칩셋계를 사용하여 공진 고리 간섭계를 구성했다. 그림

3은 이중 공진 고리 간섭계의 실험 장치도이다. 구성된 공진 고리 간섭계의 한쪽은 PZT(Piezoelectric Transducer)로, 다른 한쪽은 스피커로 위상 변조를 시켰다. 이때 서로 독립적으로 위상 변조 시켰을 때와 동시에 위상변조를 시켰을 때의 출력 모양을 광 다이오드로 받아 오실로스코프로 관측하고 이 신호를 A/D 변환기(converter)를 사용하여 컴퓨터에 저장해 FFT(Fast Fourier Transformaton)로 분석하였다. 가해진 변조 주파수는 500 Hz - 30 KHz로 변화시켰다.

그림 4는 단일 공진 고리 간섭계의 실험장치도이다. 이것 또한 이중 공진 고리 간섭계와 같은 방법으로 실험하였으며, 이 때 나오는 출력 특성을 이중 공진 고리 간섭계와 서로 비교하였다.

IV. 결과 및 논의

1) 이중 공진 고리 간섭계와 단일 공진 고리 간섭계의 출력 모양
그림 5는 이중 공진 고리 간섭계의 감지고리를 변조시켰을 때 출력끝(output port)을 통해 나오는 신호를 오실로스코프로 관측한 모양이다. 그림 5의 a)는 PZT에만 변조신호를 가했을 때의 출력 모양인데, 이 그림에서 보듯이 PZT의 변조주파수에 따라 출력 모양이 달라지며, 이 모양은 변조신호의 진폭에도 관계한다. 그림 5의 b)는 스피커에만 변조신호를 가했을 때의 출력 모양이다. 스피커를 통한 출력 모양도 PZT의 경우와 같이 변조주파수와 변조신호의 진폭에 따라 달라진다. PZT와 스피커에 동시에 변조신호를 가해, 각각의 출력 모양이 합성된 새로운 신호가 나오게 된다. 그림 5의 c)는 동시 변조시켰을 때의 합성된 신호의 출력 모양이다. 이것은 그림 5의 a)와 b)를 곱한 출력신호의 모양을 갖는다. 이것을 확인하기 위해 식 (11), (12), (13)을 전산시뮬해 보았다. 그림 7은 이중 공진 고리 간섭계의 출력모양을 전산시뮬한 결과이다. 그림 5와 그림 7을 비교하면 출력모양이 맞아 떨어질 수 있다.

그림 6은 단일 공진 고리 간섭계를 통해 나오는 출력신호를 오실로스코프로 관측한 모양이다. 그림 6의 a)는 PZT에만 변조신호를 가했을 때 나오는 출력모양이고, 그림 6의 b)는 스피커에만 변조신호를 가했을 때 나오는 출력모양이다. 이 둘의 모양은 그림 5의 이중 공진 고리 간섭계의 경우와 차이가 없음을 알 수 있다. 그러나 그림 6의 c)에서 볼 수 있듯이 이 둘을 동시에 위상 변조시켰을 때의 출력모양은 이중 공진 고리 간섭계의 경우와 다름을 알 수 있다. 이것은 식 (5)에서 보듯이 PZT를 ω_1 , 스피커를 ω_2 로 위상 변조시켰을 때 ω_1 과 ω_2 의 합성된 형태로 위상 변조시킨 꼴이 된다.

결과적으로 이중 공진 고리 간섭계는 PZT에는 ω_1 , 스피커에는 ω_2 로 위상 변조시켜서 나오는 각각의 모양을 합성한 형태의 출력신호가 관측되었고, 단일 공진 고리 간섭계는 ω_1, ω_2 의 합성된

변조신호에 따른 출력신호가 관측되었다.

2) 이중 공진 고리 간섭계와 단일 공진 고리 간섭계의 FFT를 이용한 분석

그림 8의 a)는 이중 공진 고리 간섭계에서 PZT에 9.5 KHz 스피커에 1.5 KHz로 변조신호를 가했을 때 나오는 출력의 주파수 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 1.5KHz와 9.5KHz 근처에서 출력의 상대적 크기가 peak의 모양을 갖음을 볼 수 있다. 또한 3KHz에서 0.4 정도 크기의 주파수 분포를 보이고 있으며 미세하지만 4.5KHz, 18.8KHz, 8KHz, 11KHz에서 주파수 분포를 보이고 있다. 이것은 식 (14)에서와 같이 $\omega_1, \omega_2, 2\omega_2, \omega_1 - \omega_2, \omega_1 + \omega_2$ 와 거의 동일한 값에서 주파수 분포를 갖는다.

그러므로 이중 공진 고리 간섭계에서 주파수 분포에 따른 출력 특성과 전기적인 거트계(Filter)를 이용해 ω_1 과 ω_2 의 주파수만 뽑아서 외부 섭동(길이, 온도, 입력 등)의 변화를 동시에 감지할 수 있는 장치를 만들 수 있다. 즉, 감지하고자 하는 외부 섭동들을 통해 나오는 출력을 전기적 거트계를 통과시켜 각각의 위상 변화를 따로 측정한다면, 두 가지 이상의 외부 섭동을 동시에 감지할 수 있다.¹⁰ 이러한 공진고리 간섭계를 손실 없이 여러 개 구성한다면 다중 감지기(multi-sensor)로서 응용이 가능하다.

그림 8의 b)는 단일 공진 고리 간섭계에서 PZT에 4.8KHz, 스피커에 1KHz로 위상 변조시켰을 때 나오는 출력의 주파수 분포를 나타낸 것이다. 이것은 식 (6)의 주파수 분포와 약간 다른 분포를 보이고 있다. 이러한 요인은, 단일 공진 고리 간섭계의 출력신호가 불안정하였기 때문에 정확한 주파수 분포를 얻지 못하였다.

V. 결론

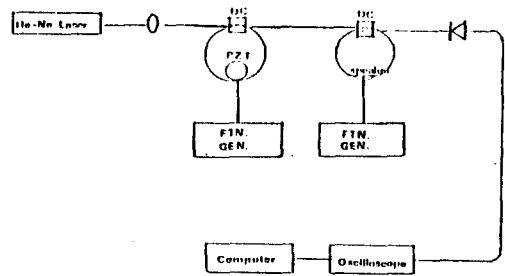
혼합모양 광섬유로 조절 가능한 공진 링갯계를 제작하여 이를 이용해 이중 공진 고리 간섭계를 구성하였다. 이것을 동시 위상 변조시켜 나오는 출력 특성을 오실로스코프로 조사하였고 전산시뮬(computer simulation)을 통해 확인하였다. 즉, 동시 위상 변조시 나오는 출력모양은 각각의 신호를 합성한 형태를 이루었다. 이렇게 합성된 신호를 전산기를 이용해 Fourier 변환을 하여 주파수 분포를 알아보았다. 또한 이중 공진 고리 간섭계와 단일 공진 고리 간섭계를 비교하기 위해 단일 공진 고리 간섭계를 이용하여 같은 실험을 하였으나 좋은 결과는 얻지 못했다. 단일 공진 고리 간섭계의 경우에는 감지고리에 위상변조를 동시에 시켜 나오는 출력 신호는 두 주파수를 합성시켜 변조시킨 형태를 이루었다.

이 실험을 통해 공진 고리 간섭계를 손실없이 여러개를 구성한다면 원거리 계속이 가능하다는 것을 알 수 있었다. 즉, 전기적인 거트계(filter)를 쓰고 외부의 영향을 최소화하여 위상변

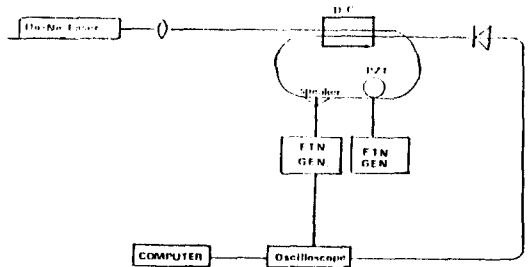
좌를 측정하면 감지하고자 하는 여러변화(길이, 온도, 압력, 가 속도 등)를 측정할 수 있는 다중 감지기로서의 응용이 가능하다.

참고 문헌

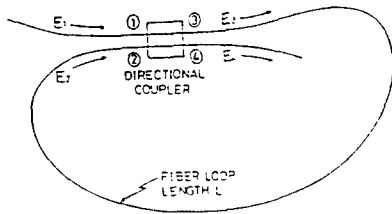
1. A.R Tebo, Electro. Opt. syst. Des, Feb. 19(1982)
2. T.G. Giallorenzi, Opt. Laser Technol. 23, 73(1981)
3. Youshihiro Ohtsuka, J. Lightwave Tech., vol.LT-3, 378(1985)
4. 이 현재, 이 동호, 오 문수, 김 영덕, 세물리, vol.26, 90(1986)
5. G.B. Hocker, Appl. Opt. vol.18, 1445(1979)
6. Michel Digonnet, H.J. Shaw, Appl. Opt., vol.22, 484 (1983)
7. Michel Digonnet, H.J.Shaw, J.Quan. Electron., vol.QE-18, 746(1982)
8. A.D. Kersey, A. Dandridge, A.B. Tveten, SPIE, vol.838, "Fiber Optic and Laser Sensors V," 184(1987)
9. Paul Urquhart, J. Opt. Soc. Am. A, vol.5,803(1988)
10. I.Sakai, G.Parry, R.C.Youngquist, Opt.Lett. vol. 11, 183(1986)



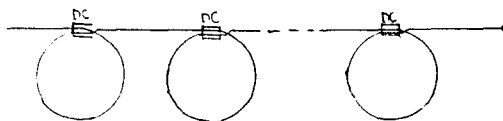
[그림 3] 이중 공진 그리간섭계의 실험장치도



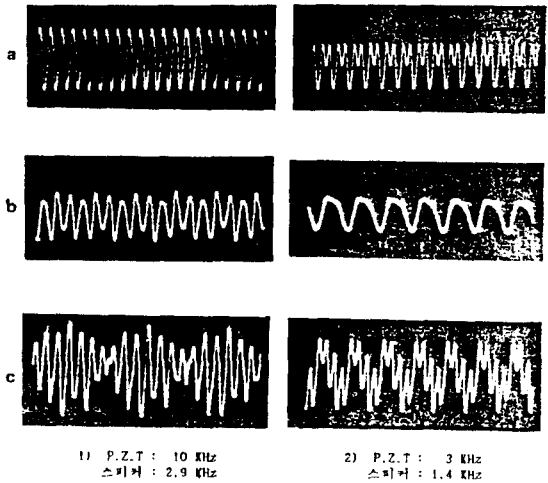
[그림 4] 단일 공진 그리간섭계의 실험장치도



[그림 1] 공진 그리 간섭계

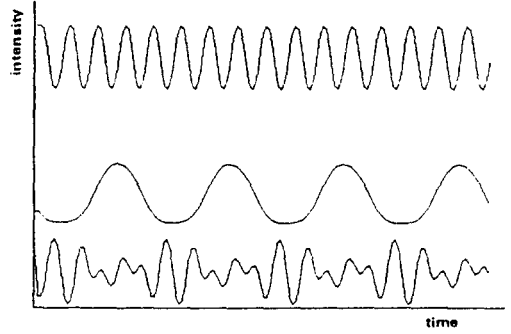
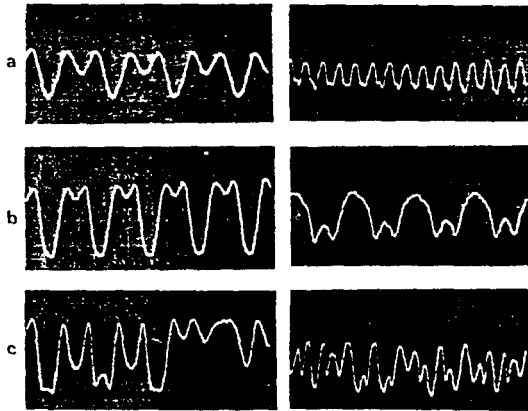


[그림 2] N개 그리 간섭계의 직렬연결



1) P.Z.T : 10 KHz
스피커 : 2.9 KHz
2) P.Z.T : 3 KHz
스피커 : 1.4 KHz

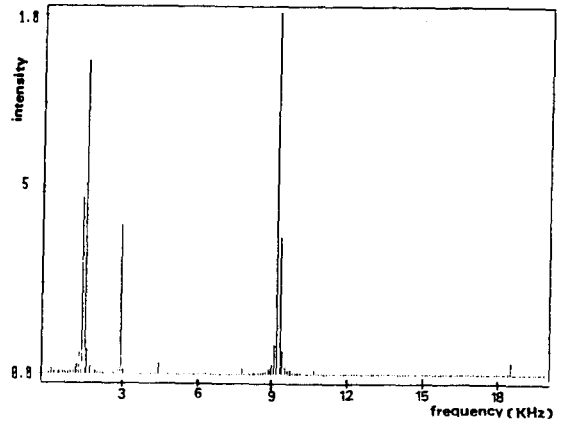
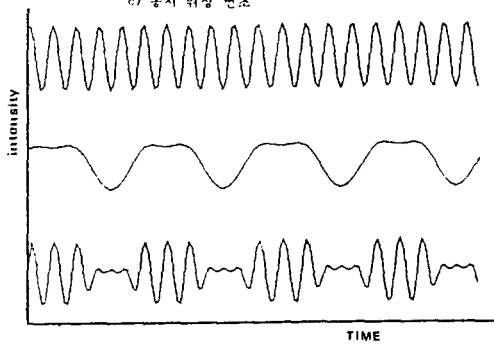
[그림 5] 이중 공진 그리 간섭계의 출력 모양
a) P.Z.T 예진 변조 신호를 가했을 때
b) 스피커에진 변조 신호를 가했을 때
c) 동시 위상 변조



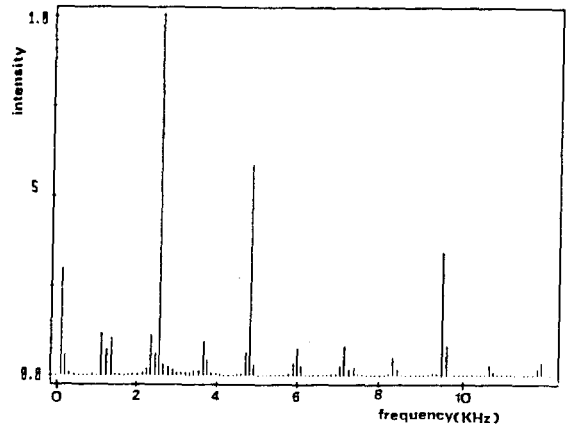
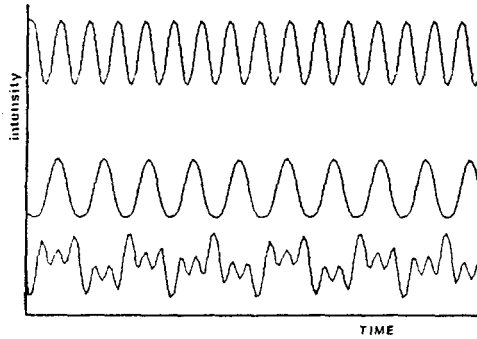
[그림 7] 이중 공진 고리 간섭계의 파구잡이 전산 시뮬

1) P.Z.T : 2.5 KHz 스피커 : 2.4 KHz
2) P.Z.T : 7.5 KHz 스피커 : 2.0 KHz

[그림 8] 단일 공진 고리 간섭계의 출력 모양
a) P.Z.T 예진 신호가 없을 때
b) 스피커 예진 신호가 없을 때
c) 동시 예진 신호



[그림 8-a] 이중 공진 고리 간섭계의 주파수 분포
P.Z.T : 9.5 KHz
스피커 : 1.5 KHz



[그림 8-b] 단일 공진 고리 간섭계의 주파수 분포
P.Z.T : 4.8 KHz
스피커 : 0.9 KHz

