

## 광섬유 Fabry-Perot 간섭계를 이용한 위상 변화량의 정밀 측정.

### Precise Measurement of the change in the optical length of a fiber Fabry-Perot interferometer.

김 영 준, 이 현 재, 오 문 수, 김 영 덕  
서강 대학교 물리학과.

## abstract

By using the single mode optical fiber, we fabricated Fiber-optic Fabry-Perot interferometer (FFPI). The change over a wide range in the optical path length of a FFPI is observed. The temporal movement of the interference fringes by external condition ( Temperature change or voltage change applied to P.Z.T ) is converted to circular motion on an oscilloscope display and then recorded with a micro-computer. For this, both a fast A/D converter and D/A converters are interfaced to the micro-computer. The two output voltages of the D/A converters are applied to X and Y terminals of oscilloscope to display circular motion on oscilloscope. Thus the direction of phase shift can be determined with observing the direction of circular motion. The variation of the optical length can be measured by calculating the angle of spot of circle with an accuracy of  $\lambda/90$  wave length due to variation of temperature in this system  $2.7 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ \text{C}$ .

### I. 서 론

최근에 광섬유를 이용한 많은 종류의 간섭식 감지기들이 개발되고 있다[1-2]. 그 종류는 Mach-Zehnder 방식, Fabry-Perot 방식, Sagnac 방식, Michelson 방식 등 여러 방법 등이 있다. 이러한 간섭식 감지기들은 빛살의 광경로차를 이용하여 위상 변화를 조사 하기 때문에 빛살의 결맞는 길이(coherence length)보다 광경로차를 짧게 구성 해야 한다.

Fabry-Perot 방식 간섭식 감지기가 다른 간섭식 감지기들에 비해 각광을 받고 있는데 그 이유는 기준 도파로와 감지 도파로를 따로 쓰지 않고 꺾짓게를 구성 하지 않으므로 그 구성이 간단하며 빛살이 광섬유 내부에서 Mach-Zehnder 식 간섭계 보다 두 배의 광경로차를 느끼므로 더 민감하게 감지 하기 때문이다. 기본적인 Fabry-Perot 식 광섬유 간섭계 원리는 잘 알려져 있다[3]. 그리고 다른 간섭식 감지기와 같이 간섭무늬의 변화로 광섬유의 길이 혹은 굴절률 변화로 외부 영향을 추론 할 수 있다. 예를 들어 온도 변화에 대해 광섬유의 길이가 변하면 광경로차가 생겨 위상 변화가 생긴다. 그 위상 변화를 측정하여 온도 변화를 감지 할 수 있다.

위상의 변화는 일반적으로 간섭무늬의 이동 갯수를 세는 방법으로 측정한다. 그런데 이 방법은 간단해도 그 해석은 그렇지 못하다. 왜냐하면 단지 이동갯수를 세는것에 불과하고 광경로차가 늘어나는지 혹은 감소하고 있는지는 간섭무늬의 대칭성 때문에 알 수 없기 때문이다. 그래서 광경로차의 증감 방향을 알기 위해 다른 요인을 첨가 해야 하는데 그 방법으로 두 개의 모드를 갖고 각 모드의 세기가 다른 빛을 이용함으로써 광경로차의 변화 방향을 결정 할 수 있었지만 이는 측정하는 온도의 범위, 광섬유의 길이와 특성에 영향을 받는다[5]. 또한 광경로차가 광섬유 내에서 빛의 반 파장 보다 작게 되면 이 방법으로는 더 이상 광경로차를 알아 낼 수 없다. 반 파장 이하로 변하는 광로차에 대해 정밀하게 측정하는 실험은 발표된 바[6-7] 있지만 이는 광경로차의 증감에 대해서 구분 할 수 없었다. 이러한 문제를 해결 하기 위해 광섬유를 감은 P.Z.T 에 수 Hz 정도의 삼각파 변조신호를 가해 변조 신호가 올라 갈 때 간섭무늬 최대치 사이의 시간과 내려갈때 최대치 사이의 시간 간격을 비교 하여 광경로차와 증감 방향을 구분 할 수 있는 방법이 제시된 바 있다[12]. 그러나 이 방법은 구성은 간단하나 그 해석은 변조 신호와 같이 비교해야 하므로 불편하다.

이 논문에서는 D/A 변환기(converter) 3 개와 A/D 변환기 1 개를 전산기와 맞겨트어(interface) 전산기로 하여금 직접 변조 신호를 D/A 변환기로 내 보내어 한 변조 파형 내에서 그 때의 빛의 세기 두 개를 취하므로써 정밀한 위상 변화를 측정 하고 나머지 두 개의 D/A 변환기로 오실로스코프에 가해 원을 그리게 해서 광경로 차의 증감 방향을 알 수 있도록 하였다.

### II. 실험 원리

FFPI(Fiber optic Fabry-Perot interferometer)는 광섬유 양끝을 매끄럽게 자른 다음 필요에 따라 진공 증착한 것 뿐이다. 증착을 안하더라도 공기와의 굴절률 차이로 반사율이 있다. 광섬유 한끝에서 빛을 입사 시켜 광섬유 양단에서 다중 반사 된 후 다른 끝으로 나온 빛의 특성은 다음과 같다[3-4].

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{1 + [4R/(1-R)^2] \sin^2 kh} \quad (1)$$

(1) 에서 광섬유의 양끝에서의 반사율이 작다고 하자. 그러면 (1) 식은 다음과 같이 주어 진다.

$$4R/(1-R)^2 \approx 4R$$

$$\frac{1}{I_0} = \frac{1}{1 + 4R/(1-R)^2 M \sin^2 \theta} \approx \frac{1}{1 + 4R \sin^2 \theta}$$

$$\approx \frac{1}{1 - 4R \sin^2 \theta}$$

$$= \frac{1}{1 - 2R + 2R \cos 2\theta}$$

$$= \frac{1}{1 + 1m \cos 2\theta} \quad (2)$$

$$\bar{I} = 1 - 2R, \quad 1m = 2R$$

$$\theta = kh, \quad k = 2\pi / \lambda$$

이것은 R 값이 작아 다중 반사율이 무시된다. 즉 이 경우에는 Mach-Zehnder 식 간섭계와 같은 결과식을 얻는다. 다시말해 두 개의 빛살의 간섭과 같은 식이 된다.

h의 길이 변화에 대해 투과 되는 빛의 세기는 주기적으로 변한다. h를 다음과 같이 놓자.

$$h = \bar{h} + \Delta h \quad (3)$$

Δh는 P.Z.T에 인위적으로 가하는 변조항이고 h는 그 변조 주기 내에서 평균 길이이다. 이때 h의 진폭은 빛의 반 파장 이상으로 한다. h의 변화는 아래 조건을 만족한다고 하자.

$$\frac{1}{\bar{h}} \frac{dh}{dt} \ll \lambda \quad f: \text{변조 주파수}$$

이는 h의 시간에 대한 변화율이 Δh보다 상당히 작음을 의미한다. 이 조건을 만족 할때 간섭 무늬의 이동 모양은 Δh축에 대해 h변화에 따라 평행하게 움직인다. h가 반 파장 만큼 변하면 그것은 무늬 한개가 Δh축에 대해서 이동한 것과 같다. 이 h의 변화에 대해 이동된 위상 변화를 알려면 한 변조 주기내에서 임의로 두 개의 순간적인 빛의 세기 Ix, Iy를 측정해 그때의 변조 길이는 각각 Δhx, Δhy라 하자.

$$Ix/I_0 = \bar{I} + 1m \cos 2k(\bar{h} + \Delta hx) \quad (4)$$

$$Iy/I_0 = \bar{I} + 1m \cos 2k(\bar{h} + \Delta hy) \quad (5)$$

h가 느리게 변화할 때 Ix와 Iy는 다음과 같은 식으로 X-Y 평면에 점을 그린다.

$$X^2 + Y^2 - 2XY \cos \delta\phi = \sin^2 \delta\phi \quad (6)$$

$$X = (Ix/I_0 - \bar{I}) / 1m \quad (7)$$

$$Y = (Iy/I_0 - \bar{I}) / 1m \quad (8)$$

$$\delta\phi = 2k(\Delta hx - \Delta hy) \quad (9)$$

식 (6)은 타원의 방정식이다. 특히

$$\delta\phi = (p + 1/2)\pi \quad (p = 0, 1, 2, \dots) \quad (10)$$

일때는 원의 방정식이 된다. Δhx와 Δhy를 적당히 조정하여 식 (10)과 같은 조건을 만족시킬 수 있다. Δhx - Δhy = λ/8가 되면 Ix와 Iy는 h의 변화에 대해서 원을 그린다. 그리고 h의 증가 혹은 감소 방향 즉 dh/dt의 부호와 p값에 대하여 원을 그리는 방향이 결정되어 h가 증가 혹은 감소하고 있는지 알 수 있다. 여기서 h의 값은 투과되어 나온 빛살을 광 다이오우드로

받아 전압의 DC 성분을 제거한 후 Vx, Vy를 취득하여

$$2kh = \theta = \arctan(Vy/Vx)$$

로 그 때의 h의 값을 알아 낸다.

### III. 실험 장치 및 방법

실험 장치는 그림 1에 보였다. 약 1m 길이의 광섬유를 지름이 2.5 cm, 두께가 5 mm인 원통형 P.Z.T에 10회 감았다. 광섬유 양끝을 매끄럽게 자른후 빛살을 빛살 가르개를 통해(Beam splitter) 광섬유에 입사시켰다. 광섬유 양끝에서 반사된 빛살은 다시 빛살 가르개를 통해 광 다이오우드에 도달한다.

이 실험을 위해 A/D 변환기(converter) 한 개와 D/A 변환기 세 개를 전산기와 맞겨두었다(interface). 먼저 8255 IC를 이용해 병렬 전송 장치를 만들고 이 장치를 통하여 A/D, D/A 변환기와 전산기 사이로 정보를 주고 받도록 하였다.

A/D 변환기는 삼성 제품으로 KSV3110이며 변환 시간(conversion time)이 500 ns로 고속이다. 이 칩안에는 D/A 변환기도 내장되어 있는데 bit 수는 10 bit이지만 하위 bit D0, D1은 쓰지 않으므로 8 bit D/A 변환기로 이용했다. 오실로스코프 화면에 원을 그리기 위하여 Analog device 제품인 AD558 8 bit D/A 변환기 두 개를 썼고 그것의 출력을 각각 오실로스코프 X, Y 단자에 연결 하였다. 두 개의 D/A 변환기를 각각 D/A1, D/A2라 하자. 8 bit A/D 데이터를 Bus를 D/A1, D/A2 데이터 Bus에 직접 연결 하였다. 그리고 D/A1, D/A2의 칩 선택 단자 CS 단자를 IN 단자가 낮은 상태(low state)로 떨어질 때만 전산기측의 주소 A0, A1에 의해 해독(decode)된 신호가 따로 가해지게 연결하였다. 그러므로 전산기가 A/D 변환기로 부터 데이터를 읽을 때 읽는 주소를 달리 함으로써 D/A1과 D/A2가 따로 선택 되면서 그 순간에 A/D가 읽은 아날로그 값을 일정 기간 동안 D/A1과 D/A2에 따로 저장 할 수가 있다. 즉 아날로그 값을 일정 기간 동안 저장 하는(sample and holding) 회로를 두 개 쓴 것과 같다.

이 장치를 제어 하기 위하여 C언어로 프로그램을 만들었다. C언어는 다른 고급 언어와 달리 한 Byte 단위로 데이터를 저장 및 계산 할 수 있고 속도도 빠르며 데이터 관리에 능률적이다[10]. 프로그램의 구성은 KSV3110의 D/A에 디지털 값을 0에서 255까지 1씩 증가 시켜서 보내고 다시 0으로 1씩 감소 시켜서 보낸다. 디지털 값을 보낼 때마다 그 때의 신호를 A/D를 통해서 읽어 전산기의 주 메모리에 저장 시킨다. 이때 D/A에 보내는 특정한 디지털 값에 대하여 다른 주소로 데이터를 읽어 내어 오실로스코프 상에 그 순간의 아날로그 값을 따로 X, Y 단자에 출력하고 그 값으로 arctan(Vy/Vx)를 계산 하여 위상을 구하도록 하였다.

우선 Δhx와 Δhy에 해당 하는 디지털 값을 얻기 위하여 몇 V를 가했을 때 광섬유 길이가 반 파장 만큼 늘어나는지 알아 보았다. 8.323 V를 가했을 때 2π 위상 이동을 알았다. 0에서 255의 값을 D/A에 순차적으로 보냈을 때 0에서 10.94 V가 D/A의 출력으로 나왔다. (실제로는 증폭기를 썼다.) 그러므로 2.08 V의 차이로 λ/8만큼 광섬유가 늘어 나고 π/4의 위상차를 얻을 수 있다. 이것은 디지털 값의 차이로 49에 해당 한다.

이 실험에서 위상을 변화 시키는 요인으로 함수 발생기(function generator)를 썼다. P.Z.T 에 가하는 변조 신호와 함수 발생기 신호를 가산 장치를 써서 P.Z.T 에 가했다. 함수 발생기의 신호는 변조 주파수에 비해 상당히 느린 수 Hz 내의 주파수로 삼각파와 사인파(sine wave)를 가하였다. 가한 신호의 주파수와 진폭을 변화시켜 가면서 위상 변화를 전산기로 측정하고 조사하였다. 또한 손으로 직접 DC 전압을 조정하여 함수 발생기 대신 P.Z.T 에 전압을 가해 관찰해 보고 오실로스코프 상에 흰 궤도를 그리고 돌아 가는 방향을 관찰하였다.

#### IV. 결과

우선 위상이 변함에 따라 오실로스코프 화면에 원을 그리는 지 알아 보았다. 그림 2 는 8V 의 삼각파를 3 Hz 로 0.5 초 동안 노출 시켜 찍은 것이다. 거의 원을 그림을 얻을 수 있었다. 1 초에 약 90 번 정도 점을 찍으면서 흰 궤도를 돌고 있기 때문에 사진에서는 점들이 아주 조밀한 간격으로 찍혔다. 위상이 증가하는지 혹은 감소 하는 지는 점들이 시계 방향 혹은 반시계 방향으로 돌아 가는 것으로서 구분 할 수 있었다.

그림 3 은 주기가 2.615 초 이고 P-P 가 15.56 V , 7.78 V , 3.50 V , 0.439 V 인 삼각파를 가했을 때 위상 변화량을 5.632 초 동안에 측정하여 512 개의 점으로 그린 것이다. 삼각파의 진폭이 낮을 수록 외부 진동과 주위의 온도 변화로 잡음이 많이 섞여 있음을 알 수 있다. 그림 4 는 각각 다른 주기를 갖고 진폭이 같은 사인파 (sine wave)를 가했을 때 측정한 위상 변화량이다. 각 주기는 3.32 초 , 1.13 초 , 0.614 초이고 P-P 가 17.20 V 이다. P.Z.T 는 가해주는 전압에 대해 그 길이가 선형적으로 변한다. 따라서 위상 변화는 가해주는 전압 파형과 똑 같아야 한다. 이 그림을 통하여 주위의 온도변화를 제외하면 거의 같은 모양으로 위상 변화가 있었음을 알 수 있다.

그림 5 는 함수 발생기 대신 DC 전압을 손으로 직접 조정하여 0 에서 17.2 V 까지 가했을 때의 위상 변화량 이다. 그림 6 은 P.Z.T 에 변조 신호와 가산 해서 가해 준 전압과 그로 인한 위상 변화량을 측정하여 그린 것이다. 평균적으로 약  $\lambda/90$  정도 오차 이내로 선형성(linearity)이 있었다.

이 실험에서 쓴 광섬유는 온도를 감지할때 42 간섭무늬/ $m^{\circ}C$  의 감지도를[11] 가지고 있다. 그러므로 이 장치는 약  $2.7 \times 10^{-4}^{\circ}C$  의 오차 범위로 온도를 감지할 수 있다.

#### V. 결론

다른 FFPI 를 이용한 감지기로서 많은 논문들이 제시된 바 있다[5]. 이들은 빛살의 간섭형태가 상쇄간섭과 보강간섭에 바탕을 두었고 또한 민감 하였다. 광섬유의 길이를 늘려 나가면 광원의 결맞는 길이가 허락하는 데로 더 민감한 측정을 할 수 있다.

이 실험에서 외부 영향을 간섭 무늬의 갯수로 세는 것 보다  $\lambda/90$  의 정밀도로 정밀한 측정을 할 수 있었고 그 증감의 방향도 알 수 있었다. 또한 위상 이동을 선형적으로 측정 할 수 있었다. 그런데 위상 변화를 측정하기 위해 그 변화가 변조 주파수 보다 상당히 느리다고 가정을 하였다. 이 실험에서는 전산기로 90 Hz

의 변조 신호를 만들었다. 외부 장치를 첨가 하여 더 빠른 변조 신호를 만들어 잡음을 많이 제거 할 수 있고 외부 변화도 더 빨리 감지 할 수 있다. 즉 계수기(counter)를 써서 D/A 에 디지털 값을 순차적으로 증가 혹은 감소 시켜 가면서 전산기는 특정한 순간의 신호만 취득함으로써 더욱 빠른 변조 신호를 만들 수 있다. 이러한 방법으로 잡음이 많이 제거 되면 더 많은 bit 수의 A/D 와 D/A 변환기를 써서 정밀도를 향상 시킬 수가 있다.

#### 참고 문헌

1. A.R Tebo, Electro. Opt. syst. Des, Feb.19(1982)
2. T.G.Giallorenzi, Opt. Laser Technol. 23,73(1981)
3. D.L.Franzen and E.M.Kim, Appl. Opt. 20,3991(1981)
4. T.Ito, "Precise Measurement of the change in the optical length of a fiber optic Fabry-Perot interferometer" Appl. opt. Vol. 25, No.7 1 April 1986
5. T.Yoshino, K.Kurisawa, K.Itoh, and T.Ose, "Fiber-Optic Fabry-Perot Interferometer and its sensor applications." IEEE J. Quantum Electron. QE-18, 1624(1982)
6. P.G. Cielo, "Fiber Optic Hydrophone: Improved Strain Configuration and Environmental Noise Protection," Appl. Opt. 18,2933(1979)
7. S.J.Pentuchowski, T.G.Giallorenzi, and S.K.Sheem, "A sensitive Fiber-optic Fabry-Perot Interferometer." IEEE J. Quantum Electron. QE-17,2168(1981).
8. Yoshihiro Ohtsuka "Optical coherence effect on a fiber sensing Fabry-Perot interferometer" Appl. Opt. 23,4316(1982).
9. Grant R.Fowles "Introduction to Modern Optics"(1975)
10. Mitchell White, Stephen Prata, Donald Martin "User Friendly Guide to the C Programming Language" (1986).
11. 이 현재 "간섭계를 이용한 광섬유 온도 감지기" 새물리 90(1986).
12. Shiao-Min Tseng and Chin-Lin Chen "Optical fiber Fabry-Perot sensors" Appl. opt. 27,547(1988).

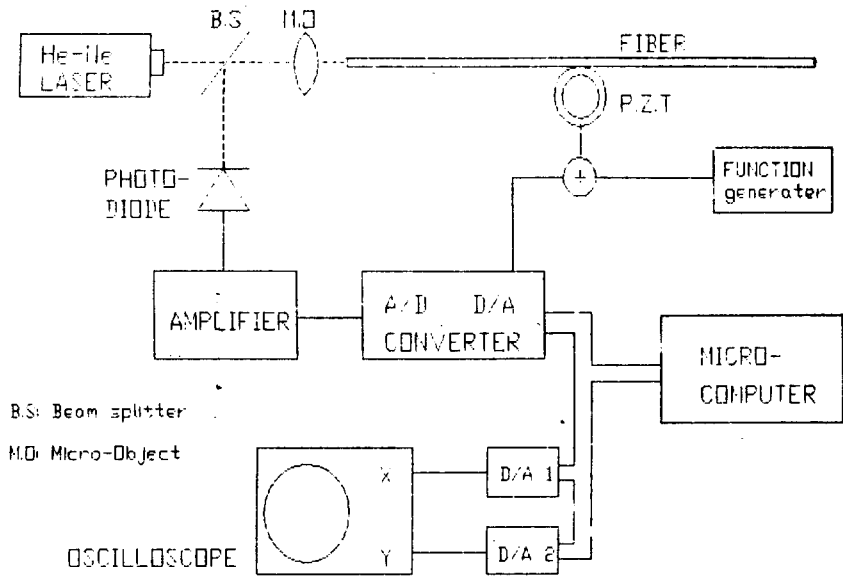


그림 1

실험 장치도

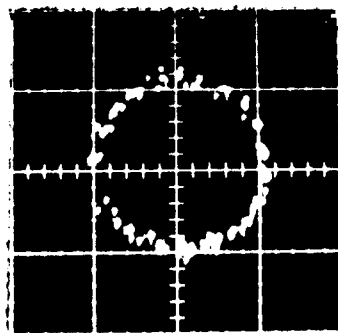


그림 2

오실로스코프 상에서 본 위상이동.  
위상이 변함에 따라 점들이 원궤도를 돌고 있음을 알수 있다.

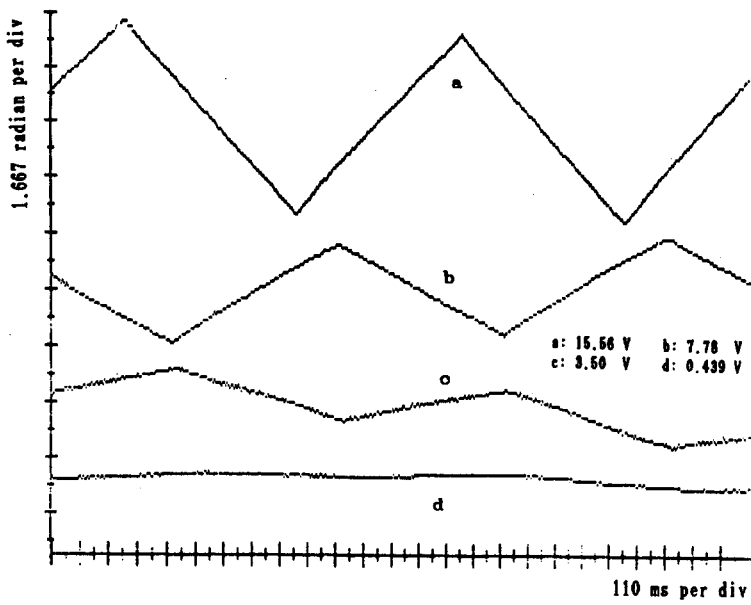


그림 3

외부 영향(여기서는 변조 신호에 함수발생기 (function generator)의 삼각파 신호를 더하여 그 신호를 외부영향으로 간주 하였다.)의 크기(진폭)에 대한 위상 변화.(주파수 일정)

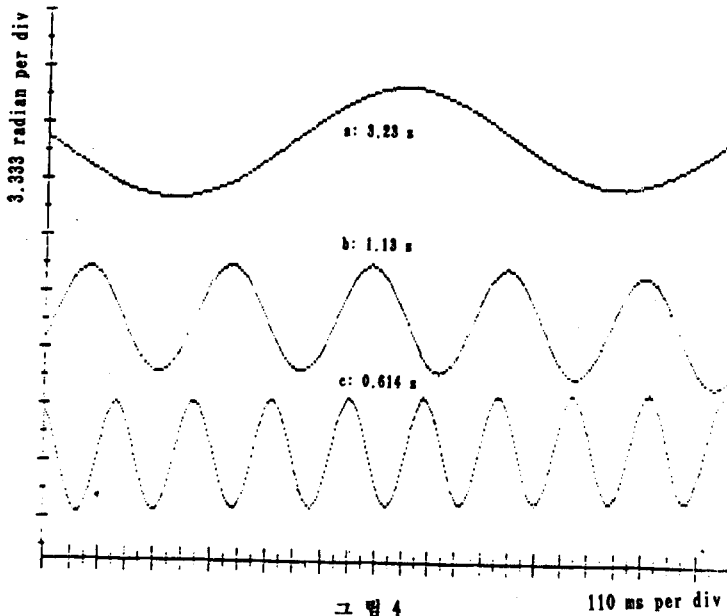
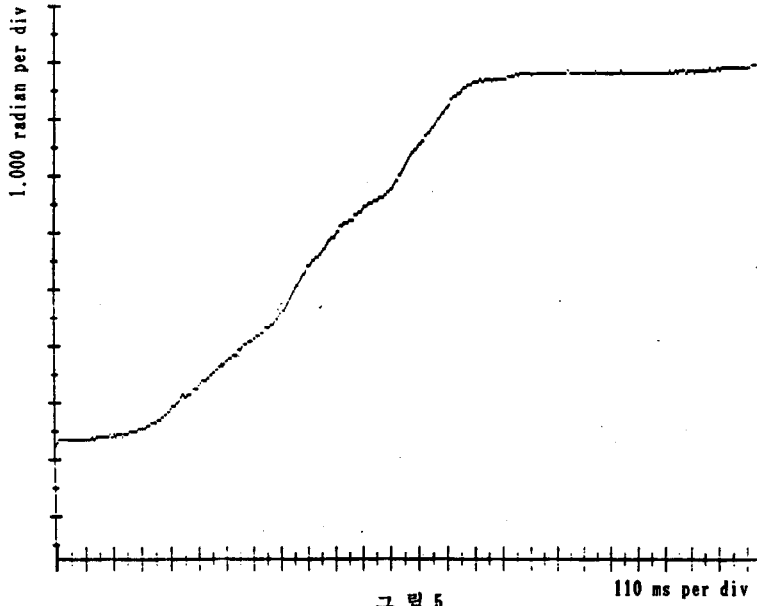


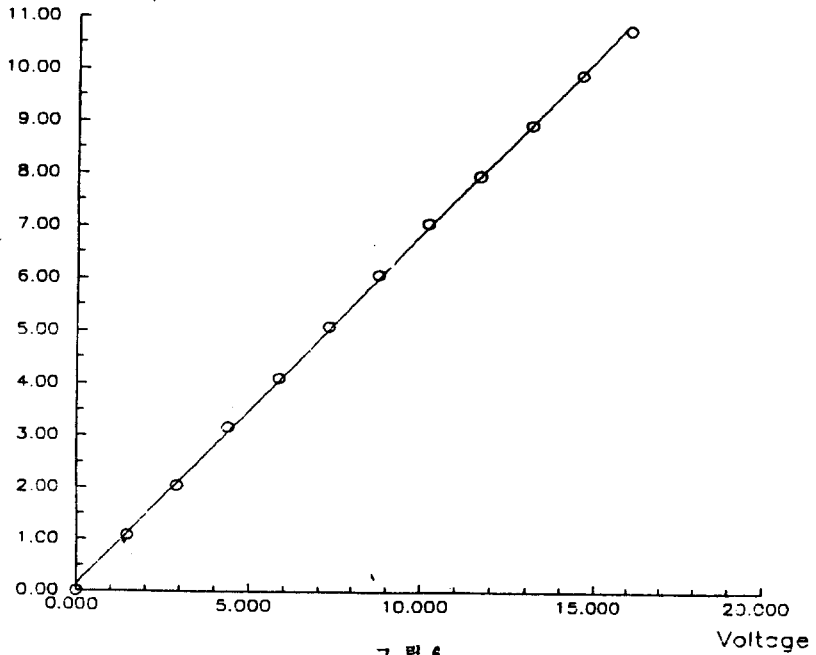
그림 4

주기 변화에 대한 위상 변화.



그 립 5

함수 발생기 대신 DC 전압을 손으로 조정해서 얻은 위상 변화.



그 립 6

외부 영향(P.Z.T 에 가해진 변조 신호를 제외한 신호) 에 대한 위상 변화량의 선형성(linearity).