

## 간접 전파광의 수광 효율 향상에 관한 연구

허 수 진\* · 정 찬 수\*\*

= Abstract =

### A Study on the Promotion of Indirect Light Receiving Efficiency

Soo Jin Huh\*, Chan Soo Chung\*\*

In the indirect optical bio-telemetry, high frequency response and low minimum detectable optical power can be achieved by using photodiode with small light receiving area which minimizes junction capacitance. But, on the other hand, S/N ratio becomes low because the optical signal current is small.

To solve such a problem, we attach plano-convex lens in front of photo diode, The results of computer simulation and experiments suggest promotion of light receiving efficiency and possibility of multi-telemetry system through directivity of convex lens in one room.

#### 1. 서 론

광통신 분야에서 광 반도체 제조 기술의 발달에 의해 직접 변조가 가능하고 비교적 출력이 크며, 값이 싼 발광 소자 및 고속, 고감도인 수광소자가 개발됨에 따라 비교적 좁은 폐공간내에서 여러 방향으로 퍼져 나가는 빛을 반송파로 하는 새로운 광통신 방식이 연구되고 있다[1]. 이러한 통신 방식에는 발광 소자에서 방사된 빛이 수광 소자로 직접 입사되는 방식 즉, 직접 전파광을 이용하는 방식과 일단, 벽등에 입사하여 반사, 산란을 반복

한 후에 수광 소자로 입사되는 간접 전파광을 이용하는 방식으로 나누어진다.

직접 전파광에 의한 통신은 직접광 전파로가 차단이 되서는 통신이 불가능하기 때문에 그 응용 범위는 제한적이다[2]. 간접 전파광을 이용한 통신에서는 장애물에 의해 직접광 전파로가 차단된 경우에도 통신이 가능하게 되어 피측정자의 활동을 제한하지 않는 무구속 원격측정이 실현될 수 있는 것이다. 그러나 간접 전파광의 세기는 직접 전파광에 비해 매우 낮기 때문에 간접 전파광을 반송파로 이용하는데 어려움이 있다. 지금까지 개발된 광전 소자들이 주로 광 섬유 통신에 사용키 위한 것들이므로 간접 전파광 통신에 사용하는 데에는 성능에 한계가 있다. 고 출력을 얻기 위해 많은 수량의 발광 다이오드를 병렬 접속하여 사용하여야 하며, 수신측에서도 여러 개의 포토 다이오드를 사용하여 수광감도를 향상시켜야 한다. 간접 전파광을 이용한 광 통신에서 포토 다이오드의 수광효율을

(접수 : 1992년 5월 8일)

\* 울산대학교 의과대학 의공학과

\* Dept. of Biomedical Engineering, College of Medicine, Ulsan Univ

\*\* 숭실대학교 공과대학 전기공학과

\*\* Dept. of Electrical Engineering, College of Engineering, Soongsil Univ

향상시키기 위하여는 수광면적이 넓은 포토 다이오드를 사용하는 방법을 생각할 수 있다. 그러나 수광면적의 크기와 포토 다이오드의 특성파는 직접적인 관계가 있다.

본 연구에서는 포토 다이오드의 수광면적과 그 특성간의 관계를 조사하고, 포토 다이오드의 수광 효율을 향상시키기 위해 포토 다이오드와 평블록 렌즈로서 수광부를 구성하고, 이 수광 장치의 수광 효율 향상을 컴퓨터 시뮬레이션으로 추정 한 후, 실제의 실험 결과와 비교하며, 포토 다이오드의 수광 효율을 향상시키기 위해 블록렌즈를 사용하는 경우의 장, 단점에 대해 검토하였다.

## 2. 포토 다이오드

포토 다이오드에는 일반 포토 다이오드, 에버렛치 포토 다이오드(APD) 및 PIN 포토 다이오드가 있다. APD는 광대역, 고감도이므로 미약한 광의 검출에 적합하다. 그러나 수광면적이 일반적으로 작고, 고가이며, 간접 전파광 응용에서처럼 신호광 이외의 빛이 동시에 수광 되는 경우에 PIN 포토 다이오드에 비해 부호 오차율이 증가하므로 간접 광 통신에 적합하지 않다고 알려져 있다[1]. PIN 포토 다이오드는 포토 다이오드의 P와 N 영역 사이에 높은 저항을 갖는 I층(intrinsic layer)을 끼어 넣은 형태이며 대부분의 광전류는 이 I층에서 생성된다. 역 바이어스가 가해지면 PN 적함에 비해 접합 용량이 작아져서 고속응답이(수백ps-수ns) 가능하게 된다. PIN 포토 다이오드는 비교적 값이 싸고, 수광 면적이 큰 것도 쉽게 구할 수 있으며, 사용이 간편하여 비교적 많이 이용된다[3]. 본 논문에서는 PIN 포토 다이오드 특성에 대해 검토기로 한다.

### 2.1 주파수 응답 특성

포토 다이오드에 흐르는 광 전류는 다음 식으로 표시된다[4].

$$i(t) = \frac{Pe\eta}{h\nu} \left(1 + \frac{m^2}{2}\right) + \frac{Pe\eta}{h\nu} - 2m \left(\frac{1 - e^{-i\omega m \tau d}}{i\omega m \tau d}\right) e^{i\omega m t} \quad (1)$$

$\eta$  : quantum efficiency

$m$  : modulation index

$p$  : optical signal power

$\omega m$  : modulation angular frequency

$\tau d$  : drift time

$\frac{1 - e^{-i\omega m \tau d}}{i\omega m \tau d}$  : transit time factor

$\bar{I} = \frac{Pe\eta}{h\nu}$  : dc average current

포토 다이오드의 접합용량(Cd)과 수광 면적(A)과의 관계는 다음과 같다.

$$Cd = \frac{\epsilon}{lp + ln} A \quad (2)$$

$\epsilon$  : 반도체 유전율

$lp + ln$  : 공간 전하층의 길이

변조 주파수의 상한치와 포토 다이오드의 접합용량(Cd)과의 관계는 식 (3)과 같다.

$$\omega m \approx \frac{1}{ReCd} \quad (Re : Cd에 병렬 등가 저항) \quad (3)$$

캐리어가 공간 전하층을 유동(drifting) 하는 시간( $\tau d$ )이 변조 주기에 비해 매우 짧다면  $\omega m \tau d \ll 1$ 이 되어 (1) 식에서 신호전류는 최대가 된다. 마찬가지로 감지해야 할 빛의 변조 주파수가 충분히 작아도 동일한 결과가 얻어지며 이 때는  $\omega m \ll (1/ReCd)$ 가 된다. 또한 식 (2), (3)에서 Cd가 크면 주파수 특성이 저하되며, 수광면적이 크면 Cd가 커진다.

주파수 응답 특성을 결정하는 요인으로서

(1) 전자, 정공이 공간전하층을 이동하는 시간

(2) 접합 용량과 외부 저항이 시정수

이지만 실용적으로는 (2)가 지배적이다[5]. 따라서 고속응답을 원하는 경우는 부하 저항을 작게 하고, 감도가 허용하는 범위에서 접합 용량이 작은 포토 다이오드를 선택해야 한다.

### 2.2 신호대 잡음 특성

신호광의 검출 한계는 수광부에서 발생하는 잡음으로 결정된다고 할 수 있다. 이러한 잡음은 주로 포토 다이오드 및 연산 앰프(OP amp)에서 발생한다. 연산 앰프의 사용에서 전압 이득은 작고 전류 이득은 크므로 전류 노이즈가 지배적이다. 따라서 연산 앰프는 가급적 전류 노이즈가 작은 것을 사용하면 좋고 여기서는 포토 다이오드에서 발생하는 잡음에 대해 논한다. 포토 다이오드에서 발

생하는 잡음에서 쇼트 잡음(shot noise)과 열잡음(thermal noise)이 있으며 다음과 같이 설명된다 [4].

- 열잡음 : 캐리어 열운동 교란으로 소자의 양단에 나타나는 불규칙한 전위차에 의한 잡음으로 식 (4)와 같다.

$$\overline{in1^2} = \frac{4ke\Delta r}{RL} \quad (4)$$

k : Boltzmann's constant

Te : effective noise temperature

RL : load resistance

- 쇼트 잡음 : 포토 다이오드에 전계를 인가하고 전류를 흘릴 때 캐리어의 수 또는 드리프트 속도 중 어느 하나의 동요로 생기는 잡음으로 식 (5)와 같다.

$$\overline{in2^2} = \frac{3e^2(P+Pb)\eta \Delta r}{h\nu} + 2e id \Delta r \quad (5)$$

id : dark current

Pb : back ground optical power

P : optical signal power

$\Delta r$  : desired modulation bandwidth

$$\Delta r = \frac{1}{2\pi RL Cd} \quad (6)$$

신호 전력은  $\overline{is2^2} = 2\left(\frac{Pe\eta}{h\nu}\right)^2$ 로 표시되므로 출력단에서 신호대 잡음 전력 비는 다음과 같이 표시된다.

$$S/N = \overline{is2^2} / (\overline{in1^2} + \overline{in2^2}) \quad (7)$$

열잡음이 쇼트 잡음보다 훨씬 크므로

$$S/N = \overline{is^2} / \overline{in1^2} \quad (8)$$

여기서 감지 가능한 최소 신호 전력(minimum detectable power)은  $S/N=1$ 일 때이며 식 (6), (8)에서 식 (9)와 같이 된다.

$$P_{min} = \frac{h\nu}{e\eta} \sqrt{\left(\frac{2kTe \Delta r}{RL}\right)} \\ = 2 \sqrt{\pi \frac{h\eta \Delta r}{e\eta}} \sqrt{(k Te Cd)} \quad (9)$$

접합 용량이 작은 포토 다이오드는 감지가능 신호전력이 작아진다. 또한 포토 다이오드에서 신호광에 의한 전류와 암전류는 수광면적에 비례한다 [6].

이상의 검토를 정리하면 포토 다이오드의 수광

면적이 작으면 포토 다이오드의 암전류와 신호전류가 작아지며 접합용량도 작아진다. 따라서 쇼트 잡음 및 열잡음이 커지고 신호광 전류가 작아지므로 S/N은 저하하나, 감지가능 최소 신호전력은 작아지고 주파수 특성이 좋아진다. 반면에 수광면적이 큰 포토 다이오드를 사용하면 S/N비는 좋아지나 감지 가능 최소 신호전력이 커지며, 접합 용량이 커지므로 수광부의 주파수 특성은 나빠진다.

그러므로 포토 다이오드의 수광면적을 그대로 두고 외관상으로만 증가시킬 수 있다면 주어진 포토 다이오드의 최소 감지 신호전력, 주파수 특성 등을 그대로 유지하면서 S/N비를 향상시킬 수 있다. 이러한 방법으로서 평볼록렌즈 또는 오목거울을 사용하여 입사되는 빛을 포토 다이오드로 집속시키는 것을 생각할 수 있다[7]. 그러나 오목거울의 사용은 크기, 설치 면적 등의 문제로 실제 사용에 불편하므로 본 논문에서는 볼록 렌즈를 이용하는 집광 방법을 연구하였다.

### 3. 컴퓨터 시뮬레이션

그림 1과 같은 평 볼록렌즈(Planno-Convex Lens)와 수광소자로 구성되는 기본적인 광학계에 수광소자로 입사되는 광선(rays)에 대한 지향성을 검토한다. 이 광학계를 통과하는 광선에는 meridional 광선과 skew 광선이 있다. meridional 광선은 광축을 포함하는 meridional 평면에 존재하며 이러한 광선의 추적은 평면기하의 문제가 된다. 그러나 meridional 평면 이외에서 입사하는 광선 즉 skew 광선의 광학계에서의 추적은 입체 기하의 문제가 된다[8].

볼록렌즈의 지향성 계산에는 광축에 대해 여러 방향에서 입사하여 오는 광선들(rays)을 대상으로 하므로 일반적으로 가우스 광학은 적용할 수 없다. 그러므로 광선추적(ray tracing) 기법, 즉 어떤 광학면에서 위치와 방향이 주어지는 광선 하나 하나에 대하여 스넬의 법칙을 사용하여 다음 광학면에서의 광선 위치와 방향을 계산하는 수법을 이용한다[9]. skew 광선의 추적에서 광축을 z축으로 하고 이에 법선인 x축, y축을 설정하여 계산한다.

광선(ray)이 점 P1(x1, y1, z1)에서 점 P2(x2,

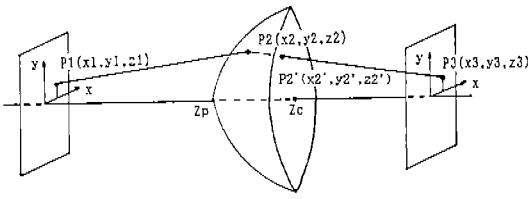


그림 1 평 볼록렌즈를 사용한 광학계에서의 광선 추적

Fig. 1 Tracing a skew ray from one surface to next through plano-convex lens.

$y_2, z_2$ )로 입사할 때 두점 간의 거리 D는

$$D = \sqrt{\{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2\}} \quad (10)$$

가 되며 방향 여현(direction cosine) X, Y, Z는 다음과 같다.

$$X = (x_2 - x_1)/D \quad (11)$$

$$Y = (y_2 - y_1)/D$$

$$Z = (z_2 - z_1)/D$$

$$\text{또한 } X^2 + Y^2 + Z^2 = 1$$

점 P2의 좌표를 점 P1의 방향 여현을 이용하여 표현한다.

$$x_2 = x_1 + DX \quad (12)$$

$$y_2 = y_1 + DY$$

$$z_2 = z_1 + DZ$$

렌즈 표면의 각 점에서의 입사각 I 및 굴절각 R은( $r$ : 렌즈의 반경)

$$\cos I = \frac{-1}{r} [x_2 X + y_2 Y - (z_2 - z_1) Z] \quad (13)$$

$$\cos R = \sqrt{\{1 - (n_A/n_L)^2 + (\cos I n_A/n_L)^2\}} \quad (14)$$

$n_A$ : 공기의 굴절율

$n_L$ : 렌즈의 굴절율

렌즈 표면의 각 점에서 굴절 여현(refraction cosine)은

$$X' = \frac{n_A}{n_L} X - \frac{1}{n_L r} [n_L \cos R - n_A \cos I] x_2 \quad (15)$$

$$Y' = \frac{n_A}{n_L} Y - \frac{1}{n_L r} [n_L \cos R - n_A \cos I] y_2 \quad (16)$$

$$Z' = \frac{n_A}{n_L} Z - \frac{1}{n_L r} [n_L \cos R - n_A \cos I] (z_2 - z_c) \quad (17)$$

또한  $Z' = \frac{z_2' - z_2}{D'}$  이므로  $Z', z_2', z_2$ 를 대입하

여  $D'$ 를 구한 후  $X' = \frac{x_2' - x_2}{D'}$  및  $Y' = \frac{y_2' - y_2}{D'}$

에서  $x_2', y_2'$ 를 구한다.

이렇게 하여 빛이 공기중에서 렌즈로 입사, 굴절할 때의 관계식들이 얻어지며 렌즈를 통과한 후의 관계는 이상의 방법을 반복하여 얻을 수 있다.

즉, 점  $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 에서 광선이 입사할 때 수광평면 상의 좌표  $P_3(x_3, y_3, z_3)$ 를 구할 수 있다. 위와 같은 결과를 이용하여 1개의 평 볼록렌즈와 수광 소자로 구성되는 기본적인 광학계에서 수광 장치의 지향성 계산을 위한 컴퓨터 시뮬레이션을 한다. 이 시뮬레이션 프로그램의 흐름도는 그림 2와 같다.

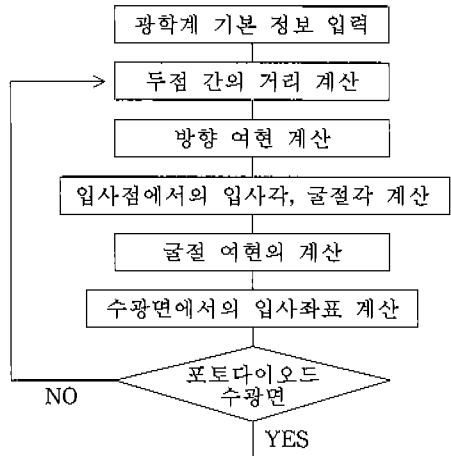


그림 2 광선 추적 알고리즘의 흐름도

Fig. 2 Flow chart of skew ray tracing algorithm

이 프로그램에서 우선 광학계의 기본 정보 즉, 렌즈의 곡률 반경, 렌즈의 굴절율, 원점( $z=0$ )에서 렌즈의 정점(vertex), 렌즈의 중심 및 수광소자까지의 거리 등을 입력한다. 그리고  $z_1$ 에서 709개의 광선들(rays)로 구성된 반경 15mm의 원형 광속(분포 면적  $707\text{mm}^2$ )을 입사시킨다.

광속의 입사 각도를 0도에서 75도까지 15도 단위로 변화시키면서, 각 입사각도에서 렌즈와 포토다이오드까지의 거리를 0mm에서 27mm까지 3mm 단위로 변화시켰을 때, 광선 하나 하나마다 광선 추적(ray tracing)을 하여 포토 다이오드의 수광면(반경 5mm의 원형면) 내에 입사하는 광선의 갯수



투과되는 투명관으로 접속한 경우 등 2가지 경우를 각각 실험하였다. 송광기와 수광기의 배치는 그림 5와 같으며  $\theta$ 는 0도에서 90도까지 15도씩 7단계로 변화시켰으며 수신부의 수광 강도는 포토 다이오드의 출력 전압치를 측정 한 후, 렌즈를 사용치 않았을 때의 포토 다이오드의 출력값을 1로 정규화(normalization)한 값으로 표기하였다. 실험은 유리창이 없는 실내(240×310×250cm)에서 실시되었다.

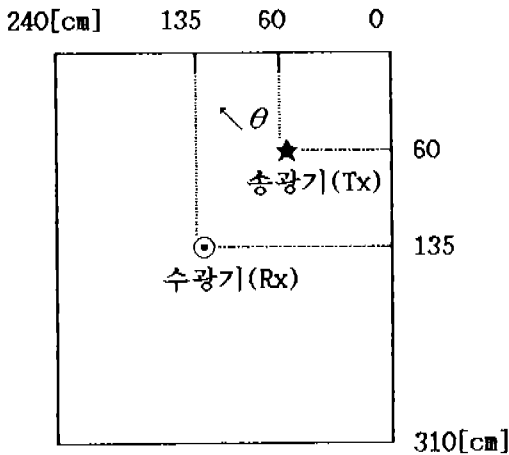


그림 5 송, 수광기 배치도  
Fig. 5 Layout of transmitter and receiver

렌즈와 포토 다이오드 사이를 불투명관으로 하여 외부 빛을 차단한 후, 송광 출력을 강하게 하고 측정한 결과가 그림 6-a이고, 약하게 하고 측정한 결과가 그림 6-b이다. 또한 렌즈와 포토 다이오드 사이가 투명관이며 송광 출력이 강할 때 측정한 결과가 그림 6-c이며 약할 때 측정한 결과가 그림 6-d이다. 그림 6의 y축은 1은 렌즈를 사용치 않았을 때의 포토 다이오드의 출력치를 의미한다.

렌즈를 사용하지 않은 경우, 포토 다이오드의 출력은 송광출력이 약하더라도 송광 각도에 상관없이 비슷한 크기의 수광 출력을 발생한다. 렌즈를 사용한 경우 송광 방향에 따라 수광 출력간의 편차가 크며 특히 송광출력을 약하게 하면 수광 출력이 거의 감지가 되지 않는 경우도 많다. 이러한 것은 컴퓨터 시뮬레이션에서 보았듯이 렌즈의 방향성 때문이라고 생각되어 렌즈와 포토 다이오드

사이를 불투명 원형관으로 연결하여 외부 빛이 렌즈의 전면부에서만 입사하도록 하여 실험하고 또 불투명 원형관 대신 투명 원형관을 사용하여 외부 빛이 렌즈 전면부 이외의 곳에서도 입사하도록 구조를 바꾸어 실험함으로써 렌즈의 방향성의 영향을 줄이고자 하였다.

### 송광 출력이 강할 때

1) 수광 출력이 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 경향은 일치되나 집속도의 크기에 차이가 있다(그림 6-a). 이는 컴퓨터 시뮬레이션에서는 원형 광속이 동일한 입사각으로서 렌즈의 전면부로 직접 입사하는 경우이고 실험에서는 빛이 벽, 천정, 바닥 등에 반사, 산란 후 입사되는 것이므로 렌즈에 입사되는 광자의 갯수가 현저히 줄었기 때문이며, 입사되는 광자의 입사각도-뎀넨하다.

2) 송광 방향에 따라 수광 출력의 편차가 크다. 이는 렌즈의 방향성 때문에 입사되는 광자의 수가 줄었기 때문이다. 렌즈가 없으며 크기가 비슷한 수광 출력이 발생한다.

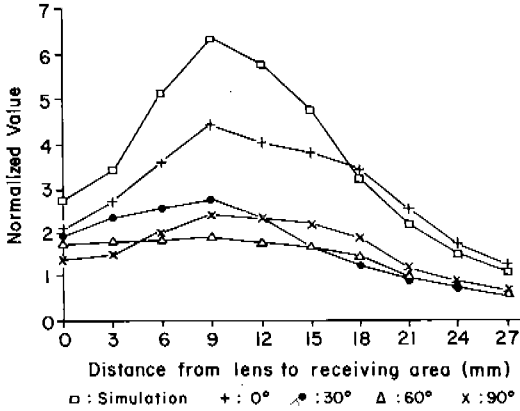
3) 렌즈와 포토 다이오드 사이를 투명관으로 접속할 때(그림 6-c), 이 간격이 멀어지면 많은 빛이 이 간격을 통해서 입사되므로 출력이 향상되나, 이 간격이 가까우면 불투명관 사용시와 비슷한 결과를 얻는다.

### 송광 출력이 약할 때

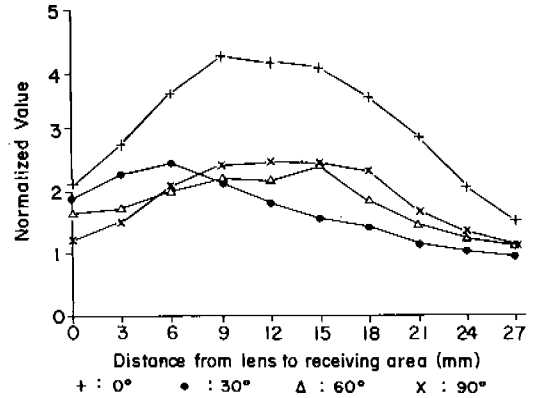
송광 출력이 약하다는 기준은 렌즈를 사용치 않으면 수광 출력이 발생하나, 렌즈를 사용하였을 때는 위치에 따라 수광 출력이 발생치 않는 점들이 생기도록 송광 출력을 감소시킨 것이다.

1) 입사되는 광량이 작을 뿐 아니라 렌즈의 방향성, 렌즈에서의 반사 등으로 실제로 투과되는 광량은 더욱 작아지고, 빛이 갖는 에너지도 렌즈에서 멀어질수록 급격히 감소하여 집광의 의미가 없어진다. 따라서 포토 다이오드가 렌즈에 가까이 있을 때가 출력이 크게 된다(그림 6-b).

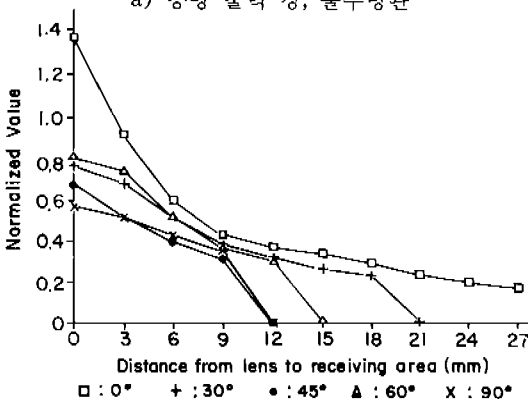
2) 렌즈와 포토 다이오드 사이를 투명관으로 접속할 때(그림 6-d), 그 간격이 멀어지면 포토 다이오드의 출력이 상승하는 것은 렌즈의 영향이 아니라 빛의 투명관을 통해서 입사하기 때문이다.



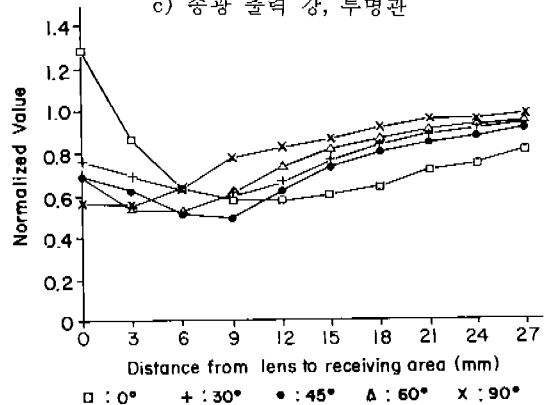
a) 송광 출력 강, 불투명관



c) 송광 출력 강, 투명관



b) 송광 출력 약, 불투명관



d) 송광 출력 약, 불투명관

그림 6 송광 방향이 변할 때, 수광면의 위치와 수광 광도의 관계

Fig. 6 Signal strength as function of the distance  $L$ (transmitter-receiver) and angle  $\theta$ . (optical axis of transmitter)

#### 4. 결 론

간접 전파광을 반송파로 하는 통신 방식에서 사용되는 포토 다이오드의 최소 감지 신호전력, 주파수 특성 등을 그대로 유지하면서 S/N비를 향상시켜 수광 효율을 향상시키기 위해 평 볼록렌즈를 포토 다이오드 전면부에 부착한 후, 컴퓨터 시뮬레이션 및 실제 실험을 통하여 이 수광계의 특성을 조사 하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 송광 출력이 큰 경우는 하나의 송, 수광기를 사용하여도 렌즈를 사용한 경우가 수광 효율이 우수하다.
- 2) 간접 전파광을 이용하는 통신에서 하나의 송

광기에 대해 평 볼록렌즈를 부착한 몇 개의 수광기를 적절히 배치한다면, 송광 출력의 대소에 상관없이, 넓은 실내에서도 방향성이 없는 완전한 송, 수광 시스템을 구축할 수 있을 것이다.

- 3) 송광기의 출력이 낮다면 하나의 넓은 실내에서 동일 파장을 갖는 몇개의 송, 수광기들을 적절히 배치하여 렌즈의 방향성을 이용한 다중 통신의 실현 가능성이 있다.

- 4) 포토 다이오드의 수광장이 작은 경우에는 렌즈로 집광하는데 어려움이 있다.

포토 다이오드의 특성을 유지하면서 S/N비의 향상을 위해 평 볼록렌즈를 사용하는 방법을 연구하였다. 위에서 제시한 것처럼 본 연구는 간접광 통신에서 여러가지 새롭고 바람직한 응용 가능성

을 보이고 있다. 좁은 범위에서의 원격 측정에서는 렌즈를 이용한 방법이 효율적이다. 그러나 좀 넓은 범위에서 간접광 통신을 위해서는 다수의 송광 다이오드를 사용해야 하며, 수광 감도의 문제로 포토 다이오드도 다수개를 사용해야 하는 현실적인 문제점이 있다. 즉 다수의 포토 다이오드 하나 하나마다 렌즈를 부착해야 한다는 불편이 있어, 렌즈를 사용하지 않고 포토 다이오드를 여러개 사용하는 편이 오히려 편리한 것이 현실적인 상황이다.

### 참 고 문 헌

- 1) N. Kudo, K. Shimizu and G. Matsumoto : Fundamental study on transcutaneous biotelemetry using diffused light, *Frontiers Med. Biol. Eng.*, 1 (1), 19-28(1988).
- 2) N. Kudo, K. Shimizu, G. Matsumoto, Simulation of Indirect Light Distribution in a Closed Space, IECEJ Technical Report, CS 86-3, 17-24(1986).
- 3) K. Shimizu. *Optical Biotelemetry*, BME 2(2), 64-67(1988).
- 4) Amnon Yariv, *Optical Electronics*. Holt-Saunders International Editions, 363-380(1985).
- 5) 稻垣正人, 파워 미터/분광 광도계/광통신 포토 다이오드, *電子技術* 29(6), 72-74(1987).
- 6) 이 영근, 전자 공학 기초, 광림사, 236-240(1987).
- 7) M. Takahashi, V. Pollak : Near Infra-red telemetry system, *Med. & Biol. Eng. & Comput.*, 23, 387-392(1985).
- 8) Miles V. Klein, Thomas E. Furtak, *OPTICS*. John Wiley & Sons, 222-233(1986).
- 9) Jurgen R. Meyer-Arendt, *Introduction to Classical and Modern Optics*. Prentice Hall, Inc., 91-106(1989).