
 論 文

水中 및 大氣空間에서 LASER 光通信의 傳送特性

(Transmission Characteristics of Laser Light Communication in Water and Atmospheric Media)

金 映 權*

(Kim, Yung Kwon)

要 約

直接光檢波方式에 의하여 變調된 LASER 光을 水中 1m 및 大氣空間 1km의 距離에 傳送하여 檢波했다. 이 檢波를 自乘檢波法으로 解析했으며 이 實驗에 使用한 檢波裝置의 設計와 構成을 밝혔다. 傳播特性의 定量的 解析은 못했지만 氣候條件에 따른 傳播傾向을 알아냈다.

氣候變化에 따른 傳播特性은 平均 25dB 程度 減衰했으며 水中에서의 減衰係數는 約 $0.4(m^{-1})$ 이었다.

Abstract

Laser light which modulated and transmitted through one-meter water bath and one-kilometer transmission distances in atmospheric media is detected by method of direct photo-detection. Also, it is analyzed as a square law detection and the experimental apparatus are designed and constructed. Consequently, in spite that the quantitative analysis remains, the availability of coherent optical communication is understood.

The average attenuation with the conditions of weather is about -25dB, and the average attenuation coefficient of water is about $0.4(m^{-1})$.

1. 序 論

보통의 光源을 Morse 符號로 點멸하여 通信을 하든가, 光線을 搬送波로하여 信號를 傳送하는 通信方式은 軍事的인 目的等の 特殊한 경우에 옛날부터 많이 사용되어왔다.

電波가 長波에서 光波帶까지에 걸쳐 널리 實用化되고, 또 無線通信, 電子工學技術이 高度로 發達함에 따라 古典的인 意味의 光通信과는 根本的

으로 다른 새로운 技術이 사용되어야 할것이며 또 계속적인 技術開發이 進行되고 있다. 즉 增幅發振, 變調, 復調, 周波數混合, 체배 그 이외의 技術이 直接 光通信方式에 응용되어지고 있다.

LASER의 出現은 光波帶周波數의 Coherence를 갖는 電磁波를 發生시키게되어, 光波帶域에서 長波領域의 모든 技術을 직접 사용하거나 약간 변형하여 사용할 수 있게 되므로 光通信方式의 개발이 쉬워졌다.

LASER에 의한 光通信은 종래의 通信에 使用하던 電波보다 周波數가 매우 높기 때문에 大容量의 傳送이 가능하고, 또 높은 指向性을 가지는 特徵이 있으므로, 이러한 特徵을 必要로하는 分

* 延世大學校 電子工學科. 正會員
 Dept. of Electronic Eng., Yonsei Univ.
 接受日字: 1971年 8月 30日

野의 特殊通信에서는 特別한 價値가 있을것으로 생각된다.

本論文은 이러한 觀點에 착안하여 大氣中과 水中에서의 LASER 光 傳播特性을 研究하고자 LASER 光檢波裝置를 構成하고 解析했으며 그 裝置를 利用하여 두가지 大氣條件에 의한 傳播特性과 세가지 種類의 物속에서의 減衰特性을 考察했다.

2. 檢波理論

光通信方式의 응용을 위한 變調과 檢波는 매우 재미있고 중요한 일이다. 즉 보통의 電磁波가 마이크로波와 같이 光波信號를 受信하기 위하여 光電檢波方式이 고려되어야 한다. 물론 그 形態나 方法은 여러가지가 있을 수 있겠지만 그들을 크게 나누면 다음 두가지의 基本的인 技術의 응용이라고 할 수 있을 것이다. 즉 光混合方式과 直接光檢波方式이다.

이 두가지는 모두 電子增幅器인 光增幅器 앞쪽에 光檢波器나 光混合器를 설치하는 것이다. 이 두 方式의 블럭선도는 그림1과 같다.

本研究에서는 LASER 裝置의 사정때문에 直接光檢波方式을 選擇했다. 光放射形 檢波器인 光電增幅管(photomultiplier)를 利用하여 마이크로波 應答을 檢出하기 위한 技術的인 方法을 使用했다.

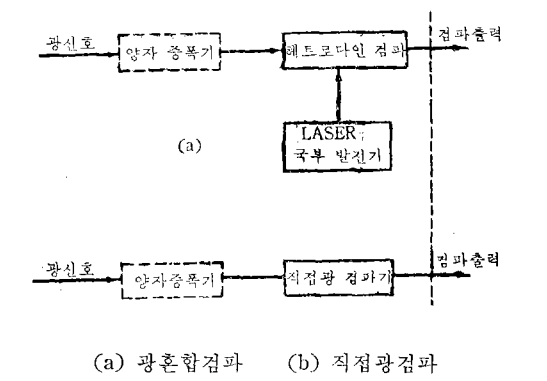


그림 1. 光電檢波블럭선도

直接光檢波는 檢波器의 分光應答으로 入射에너지를 檢波하고 電波信號를 入力信號變調에 의하여 振幅의 變化로 誘起시킨다. 이 技術은 高周波

結晶體檢波器와 概念的으로는 유사하지만 실제로는 매우 다르다. 檢波器는 光子檢波器이고 이것은 모든 波長에 걸쳐 波長마다의 特別한 量子效率를 가지고 있어 개별적인 光子에 따르게 된다. 또 比較的 넓은 高周波帶에 걸친 全入射에너지에 應答하므로 理論的으로 周波數에는 直接關係되지 않는다. 直接光檢波에서는 모든 光周波數와 位相情報는 應答하지 못한다. 즉 이 檢波器는 光캐리어의 周波數變調나 位相變調는 應答하지 못한다. 그 理由는 變移率이 檢波器의 周波數應答보다 적으면 入射電力의 振幅變移로 再生할 수 있기 때문이다.

理論的인 直接光檢波器는 信號周波數스펙트럼 내에 있는 각 光子를 檢波하고 信號周波數스펙트럼외의 光子는 檢波하지 않는 것으로 定義할 수 있고 또 內部雜音電流캐리어나 內部光電子에는 기여하지 않는 것으로 한다. 一般的으로 光電檢波器는 다음의 세가지 要求를 滿足해야 한다. 즉 (1) 가는 分子간격의 光子를 보통의 通信이나 Radar 系統과 같이 받아드리고 이 간격밖의 光子에는 작용하지 말것, (2) 한개의 量子效率를 갖 일것, (3) 內部雜音이 없을것 등이다.

光電檢波器의 感度는 다음의 세가지 때문에 制限을 받는다. 즉 (1) 光子制限, (2) 內部雜音制限, (3) 背後制限이다.

理想的으로 생각해서, 만일 入射電力이 hfn 이라면 光電檢波器는 한개의 光電子 또는 그와 等價量的 各電子에 대하여 作用하므로 $i=qn$ 과 같이 動作한다. 量子效率이 1보다 적을때 信號電力의 한부분은 어쩔 수 없이 損失되고

$$i = \epsilon qn \tag{1}$$

으로 된다. 여기서 ϵ 은 量子效率, q 는 電子의 電荷(1.6×10^{-19} coul), n 은 每秒當受信되는 光子數이다. 光電檢波器가 약간의 內部雜音을 가지고 있을때 그의 感度는 단지 量子效率에만 관계되므로 檢波器는 光子制限器로 생각할 수 있다. 이조건하에서 光電檢波器의 感度는 量子效率要素에 의하여 가능한 理論的인 感度보다 약간 떨어질 것이다. 만일 S_r 를 理論的인 光制限感度라고 하면 量子效率制限 光檢波感度는 다음과 같다.

$$S = \epsilon S_r \tag{2}$$

直接光檢波는 noncoherent 檢波로 볼 수 있다. 이 檢波는 負出力이 없고 檢波器는 正의 素子와 같이 動作한다. noncoherent 檢波應答은 다음과 같은 無限級數로 表示할 수 있다.

$$e_0 = ae_i^2 + be_i^4 + ce_i^6 + \dots \quad (3)$$

一般的으로 高次項을 無視하고 近似를 취하면

$$e_0 = ae_i^2 \quad (4)$$

으로 가정할 수 있다. 대개의 光電檢波器는 式(4)의 理相의인 自乘檢波器로 볼 수 있다. 따라서 檢波器의 出力信號와 雜音 즉 $(s_0 + n_0)$ 電壓은 入力信號와 雜音, 즉 $(s_i + n_i)$ 電壓의 自乘에 比例한다.

$$s_0 + n_0 = a(s_i + n_i)^2 = a(s_i^2 + 2s_i n_i + n_i^2) \quad (5)$$

여기서 a 는 常數이고, 出力電壓信號對 雜音比(SNR)는 다음과 같다.

$$s_0/n_0 = s_i^2 / (2s_i n_i + n_i^2) \quad (6)$$

雜音은 雜音成分사이의 비트의 結果인 n_i^2 과 信號와 雜音사이의 비트로부터 나오는 $2s_i n_i$ 의 두 項으로 이루어진다. 만일 入力信號對雜音比(SNR)가 1보다 아주 적으면 $(n_i \gg s_i)$, n_i^2 은 $2s_i n_i$ 보다 매우 크다. 고로 出力雜音과 信號는 近似的으로

$$s_0 \approx as_i^2$$

$$n_0 \approx an_i^2 \quad (7)$$

이다. 이 條件下에서 出力信號對雜音比는 다음과 같이 주어진다.

$$s_0/n_0 = (s_i/n_i)^2 \quad (8)$$

式(8)로부터 出力信號對雜音比는 入力信號對雜音比가 比較的 1보다 적은 경우는 退化되는 것이 確實하다.

光周波數에서 信號中の 離音이 중요하므로 入力信號對雜音比는 1보다 결코 적지않고 信號의 不安定振動雜音은 信號自體보다 적어야 하며 信號光子의 自乘根에 比例한다고 생각할 수 있다. 또한 內部檢波雜音은 檢波器에 대한 入力信號對雜音比를 1보다 적게하는것은 단지 背後에너지이고, 이것은 noncoherent 檢波에 의한 信號對雜音比의 격감을 일으킨다. 만일 n_b 가 信號光子의 數라고 하고 n_s 을 어떤 시간 t 동안의 信號光子라고 하면 $n_b \gg n_s^2$ 인 경우의 入力信號對雜音比는 다음과 같다.

$$\frac{si}{ni} = \frac{\sqrt{\epsilon} n_s}{n_b^{1/2}} \quad (9)$$

直接光檢波인 경우 完全自乘檢波를 數學的으로 보면 $e_0 = ae_i^2$ 이므로 振幅變調信號를 예로보면 다음과 같이 된다.

$$e_i = A_c [\cos w_c t + \frac{m}{2} \cos(w_c - w_m)t + \frac{m}{2} \cos(w_c + w_m)t] \quad (10)$$

이라면

$$e_0 = aA_c^2 \{ \cos^2 w_c t + m \cos w_c t \times [\cos(w_c - w_m)t + \cos(w_c + w_m)t] + [\frac{m}{2} \cos(w_c - w_m)t + \frac{m}{2} \cos(w_c + w_m)t]^2 \} \quad (11)$$

이 式(11)을 展開하면

$$e_0 = aA_c^2 [\cos^2 w_c t + m \cos w_c t + \frac{m^2}{4} \cos^2(w_c - w_m)t + m^2 \cos(w_c - w_m)t \times \cos(w_c - w_m)t + \frac{m^2}{4} \cos^2(w_c + w_m)t] \quad (12)$$

이 된다. 變調周波數 f_m 이외의 周波數를 필터하면

$$e_o = aA_c^2 m \cos w_m t \quad (13)$$

을 얻는다. 그러므로 信號電壓의 實効値는

$$(\bar{e}_2)^{1/2} = \frac{aA_c^2}{2} m \sim P.m \quad (14)$$

이고

$$(\bar{i}_s^2)^{1/2} \sim P.m = m\bar{i}_c \quad (15)$$

이다. 여기서 \bar{i}_c 는 캐리어電力에 의하여 생기는 平均電流이다. 式(15)에서 보면

$$\frac{\bar{i}_s^2}{\bar{i}_c^2} = m^2 \quad (16)$$

이므로 檢波信號電力은 檢波캐리어電力의 m^2 배로 된다.

3. 光電檢波裝置

變調波와 기타의 光信號를 檢出하기 위하여 위의 光電檢波理論을 中心으로 光電檢波裝置를 構成했다.

(a) 精密高電壓源

光增倍管檢波裝置의 動作電源으로 잘 安定되고

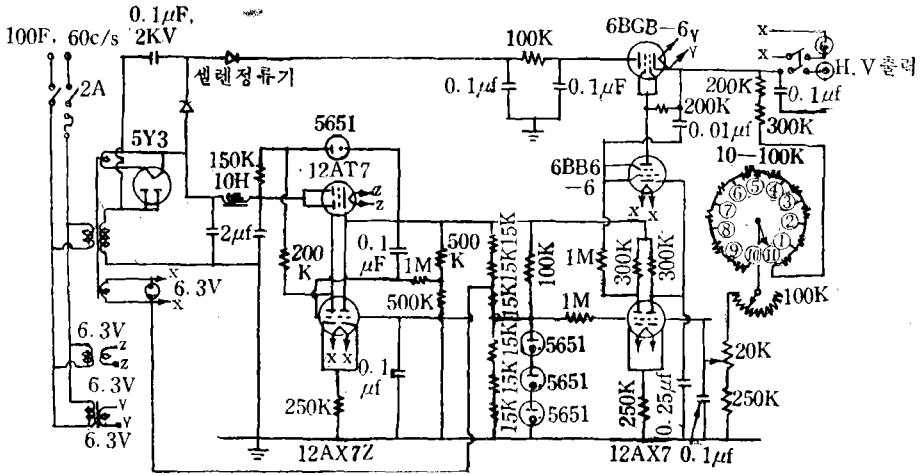


그림 2. 精密高電壓源回路
Fig 2. Precision high voltage supply circuit.

一定한 高電壓源이 必要하다. 그러므로 5651電壓調整管을 이용하여 本回路를 구성했다. (그림 2) 이 回路는 한時間當 0.01% 程度의 安定度가 있다.

이 回路의 特徵은 倍壓整流形이라는 點이다. 이 回路는 基準電壓管에 대한 一定低電壓源 縮退性 高壓調整回路 및 精密高壓 分配器等으로 分離된다. 基準電壓이 固定됐다고 가정하면 이 回路의 調整은 다음과 같이 주어진다.

$$\alpha = \frac{1}{\mu\beta A} \quad (17)$$

여기서 α 는 人力電壓變化에 의한 出力電壓分配의 變化, μ 는 直列真空管의 增幅率, β 는 出力電壓歸還率이고 A 는 增幅器의 利得을 나타낸다. 이 回路에서 $\frac{1}{\alpha}$ 은 20,000이상인 된다. 또 이 回路에서는 리플波雜音이 거의없고 人力電壓이 95Volt에서 130volt까지 變하는 동안 出力電壓은 0.01% 變한다.

(b) 前置增幅器와 電源

前置增幅器를 프린트배선하여 光增倍管하우스 안에 設置하고 動作電源은 高壓電源과 같은 사이에 設置했다.

前置增幅回路는 그림 3과 같은 Bootstrapped emitter follower 를 사용했다. 이 回路의 人力임피던스는 $20M\Omega$ 이고 10 및 $100\mu Amp$ 로 바이어스됐고 上位周波數는 T_1 과 T_2 의 遮斷周波數

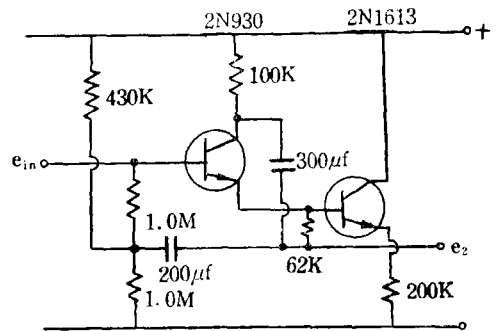


그림 3. Bootstrapped emitter follower.
Fig 3. Bootstrapped emitter follower.

hfe에 의하여 制限된다.

前置增幅器用 電源으로는 다음과 같은 條件을 전제로 電壓調整器를 設計構成했다.

$$V_{in} = 37 \sim 60 \text{ volts}$$

$$V_o = 28 \text{ volts.}$$

$$I_o \leq 0.40 \text{ Amp.}$$

$$T = -50^\circ C \sim 125^\circ C \quad (18)$$

트랜지스터形 電壓調整器回路는 그림 4와 같다. 이 회로의 各素子는 設計値에 의하고 T_1 과 T_2 는 高電壓利得 트랜지스터 2N656을 選擇하여 複合接續시켰다. 여기서 $hfe_1 \geq 20$ $hfe_2 \geq 25$ 이다. T_4 는 2N1131을 썼다. 그 이외에 基準素子등은 調整素子와 前段調整의 設計와 關係되어야 한다. D_1 의 破壞變壓은 定常調整動作에 대하여 일정하

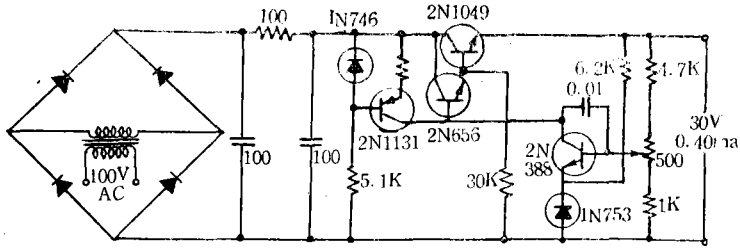


그림 4. TR 形 電壓調整器回路
Fig. 4. Transistor-type Voltage Regulator Circuit.

므로 그리 예민하지는 않다. 그러나 D_1 은 低抵抗이고 약간 正溫度係數를 갖어야 한다. 고로 Zener 電壓 6.2volt 인 1N753을 사용했다.(그림 4)

人力電壓對 出力電壓曲線을 出力電流의 變化에 대하여 그리면 그림 5와 같다. 여기서 出力電壓의 最大變化는 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta V_o = F \Delta V_{in} + R_o \Delta I_o + K_T \Delta T \quad (19)$$

여기서 K_T 는 溫度係數이고 ΔV_o , ΔV_{in} , ΔI_o 는 각각 出力電壓變化, 人力電壓化, 出力電流變化量을 表示한다.

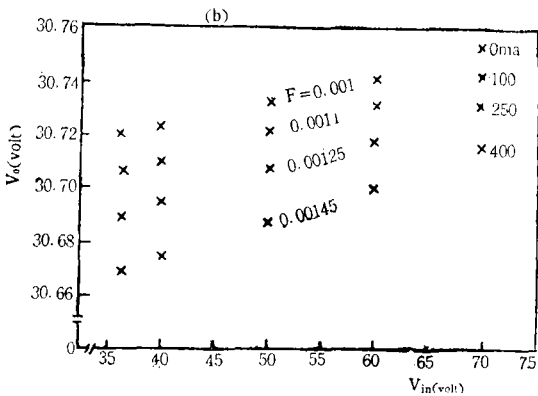


그림 5. 그림 4회로의 V_o 대 V_{in} 曲線
Fig. 5 V_o vis. V_{in} Curve of Fig. 4

(c) 光增倍管하우싱

光增倍管 IP28은 側面에 窓을 갖는 것이다. 이 光增倍管의 하우싱은 光遮斷을 고려했다. 이 筒은 알미늄으로 두 部分으로 나누어 下部에는 高壓分配器와 前置增幅器를 내장했으며, 上部에는 光增倍管을 두었다. 上部와 下部는 완전히 광차폐를 했고 入射光의 反射를 막기위해서 上部의 內壁面을 벨벳으로 발랐다. 또한 入力과 出力을 따로 終端處理했다.

(d) IP28 光增倍管特性

本研究에 使用한 光增倍管인 스펙트랄應答 S-5의 IP28을 選擇하여 光放出特性을 考察한다.

光放出特性은 特殊材料에 관계되는 것인데 이것은 陰極위에 光放出材料를 堆으로 光陰極을 形成한다. 光陰極은 光線이 떨어지면 電子를 붙여 낸다.

여기서 使用한 IP28의 特性을 보면 表 1과 같고 S-5分光應答特性은 表 2와 같다.

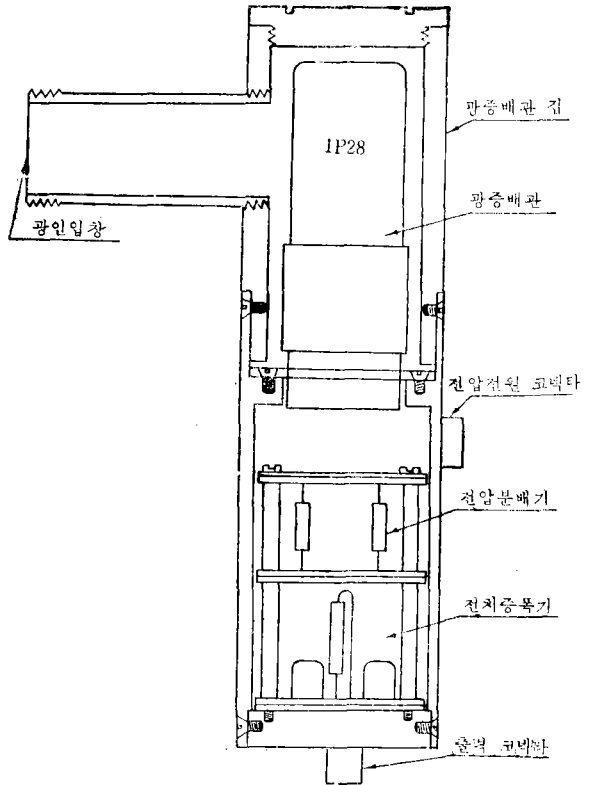


그림 6. 光增倍管 하우싱
Fig. 6. PMT Housing.

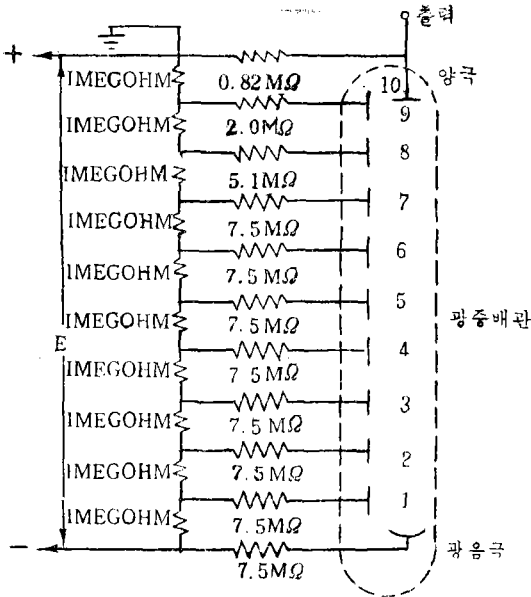


그림 7. 高光束補相用 電壓分配器回路
Fig. 7. Voltage divider circuit.

表 1. IP28의 特性

길이(in)	직경(in)	최대양극 전압(V)	조도감도 (Amp/lm)	분광응답
3 $\frac{11}{26}$	15/16	1,250	50	S-5

表 2. S-5분광응답特徵

主光陰極成分	入射窓材料	光陰極支持層	照도感도 (Amp/lm)	10°C에서의 光陰極暗電流 (Amp/cm ²)
Cs-Sb	紫外線 통과유리	부전도성재료	40~50	10 ⁻⁴

表 2에 表示된 分光應答 S-5의 光陰極의 感도와 波長의 關係를 다른 재료의 分光應答과 比較하면 그림 8과 같다. 이 그림에는 波長과 量子効率과의 關係도 圖示되어 있다.

IP28의 陽極과 光陰極사이의 電壓은 앞에서 說明한 精密高電壓源으로 1,500volt 安定電壓을 그림 7의 電壓分配器에 의하여 供給했으며 光源으로는 6328Å(4.74×10¹⁴Hz) He-Ne LASER를 使用했다. 이 波長의 光陰極感도는 약 1.5Amp/watt 이고 量子効率は 거이 1%에 해당한다.

光檢波裝置의 系統構成圖는 그림 9와 같다.

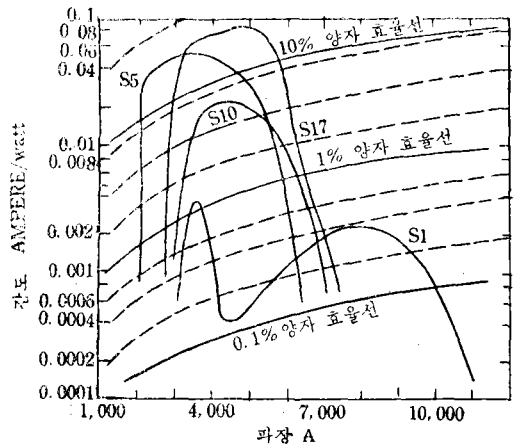


그림 8. 光陰極強度와 波長, 量子効率의 關係曲線
Fig. 8. Photo-cathode response curves.

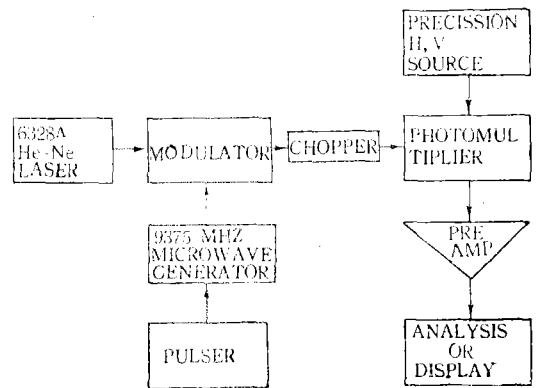


그림 9. 光電檢波系統構成圖
Fig. 9. Block diagram of optical communication experiment.

5. 大氣空間의 傳送特性

LASER 光을 通信에 應用하려고 할때 가장 問題되는 것은 LASER 光을 受信하려는 점까지의 中間媒質의 狀態라고 할 수 있다. 경우에 따라서는 特殊한 傳送用管路를 使用할 수도 있겠으나 大氣空間을 自由롭게 傳送하려면 LASER 光의 大氣空間에서의 傳播特性을 考察하지 않으면 안된다. 따라서 本研究에서는 LASER 光의 大氣空間에서의 傳播特性을 3節에서 構成한 檢波裝置를 利用하여 檢波했다.

大氣의 屈折率은 결코 一定하지 않으므로 光은 方向을 變한다. 즉 時間的으로도 空間的으로도 大氣의 屈折率이 變하여 光이 通過하면 特別한 現象이 일어난다. 또 맑은 날씨의 경우에도 空氣分子 및 그속에 포함되어있는 微細한 粒子에 의한 散亂을 받기도하고 大氣成分의 H₂O, CO₂, 기타의 分子에 의하여 吸收를 받아 光의 세기가 減衰한다. 이들의 減衰는 물론 波長에 따라 다를 것이다. 또 안개, 비 등의 日氣變化에 따라 傳播光이 받는 영향이 크다.

主要한 日氣變化에 따른 LASER 光의 傳送特性은 다음의 각 경우와 같다. 本測定은 그림 10과 같은 프로필로 시행했다. 送信點과 反射點까지의 距離는 約 500m 이고 反射點에는 20×20cm의 平面鏡을 反射鏡으로 設置했으며 送信된 LASER 光은 平面鏡에 의하여 反射되어 受信點으로 되돌아 오게 된다. 따라서 約 1km의 傳送距離에서 傳播特性을 測定한 경우와 같다. 이때 受信光學系로는 有効口徑 25cm의 凹面鏡을 使用했고 光檢波器로는 앞에서 構成한 IP28 直接光檢波裝置를 使用했으며 受信光波를 25Hz로 초핑하여 檢出했다. 送信光源은 미국 University Lab.에서 製作한 2mw 出力의 He-Ne 氣體 LASER를 使用했으며 使用波長은 6328Å이다. 또 이 LASER의 動作모드는 TEM₀₀이고 單色光이다. 4.74×10¹⁴Hz인데 이것은 輻射原子의 高速에 의하여 도플러擴張을 일으킨다.

1km의 距離를 通過한뒤의 受信 LASER 側帶波스펙트럼(λ=6328Å)은 그림 11과 같다. 이것

은 Coherent 光信號에 特性低周波스펙트럼을 同伴한다는 事實을 觀測할 수 있다.

그림 12는 오전 7시 30분부터 10시 사이에 안개 속에서 그림 10과 같은 傳送路를 利用하여 測定한 것이다. 여기서 볼수 있는것은 光의 減衰量은 안개가 짙은 時間에 더 增加하는것을 알수 있다. 이것은 前述한 바와 같이 大氣의 成分中 水分에

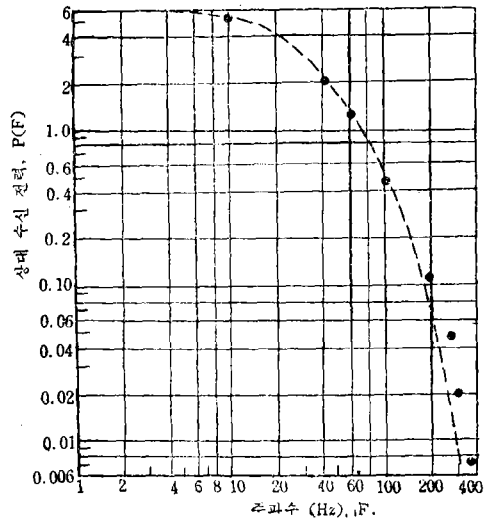


그림 11. 맑은날 大氣空間 1km 距離에서 受信한 LASER 側帶波 스펙트럼(λ=6328Å)

Fig. 11. Received laser sideband spectrum (λ=6328 Å) after transmission over 1km through clear atmosphere.

의한 吸收되어 光의 세기가 減衰되는것을 보인다

그림 13은 비오는 날 낮 10시부터 12시사이인 두時間 동안에 實測한 LASER 光 減衰量을 보인다. 實測時間 間隔사이의 降雨量도 同時에 나타

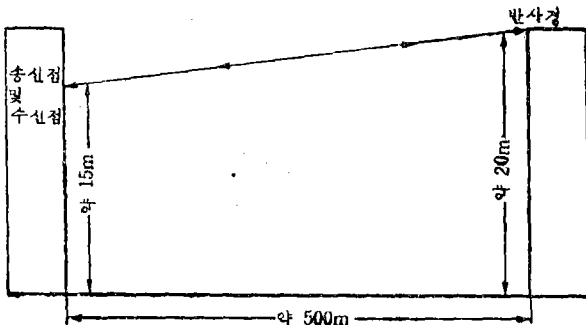


그림 10. 傳送實驗區間的 프로필

Fig. 10. Profile of transmitting experimental distances.

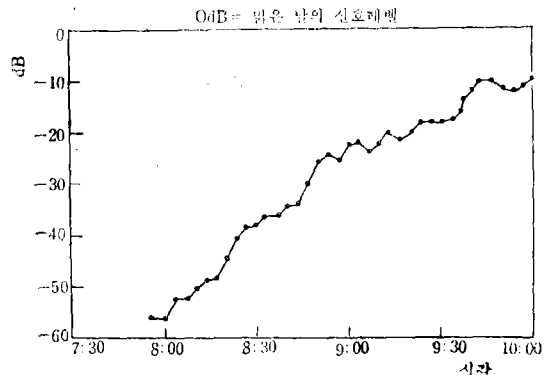


그림 12. 안개건날의 LASER 光減衰

Fig. 12. Laser light attenuation foggy morning.

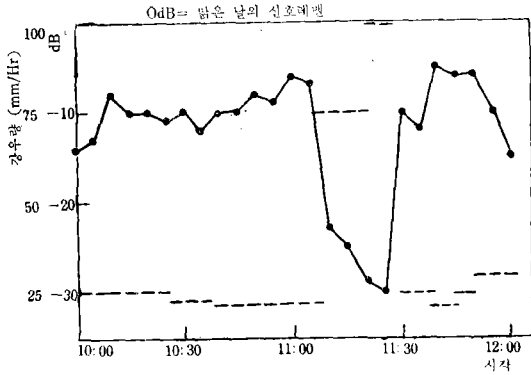


그림 13. 비에 의한 LASER 光減衰
Fig. 13. Laser light attenceation by raining after-noon

나 있다. 이 그림 13에서는 降雨量의 增加에 比例하여 減衰量이 增加하는 것을 알수 있다. 역시 大氣空間의 H₂O의 增加에 따라 光의 吸收와 散亂의 現象이 일어난다는것으로 볼 수 있다.

5. 水中의 傳播特性

LASER 光의 물속에서의 傳播特性을 調査해보는 것도 꽤 興味있는 일일 것이다. 水中通信에 LASER 를 應用할 수 있다면 海岸開發에 크게 功헌할 수 있을 것이기 때문이다.

이러한 可能性의 推定을 위하여 길이 1m의 測定用 水曹속에 증유수, 水道물 그리고 바다물을 넣고 單位길이당 透過率을 구하고 물속에서의 距離對 LAER 光의 세기를 測定하여 그 句配로 減衰係數를 구했다. 減衰係數 α는 다음式으로 定義한다.

$$p = p_0 e^{-\alpha l} \tag{20}$$

여기서 p는 거리 lm 떨어진 곳에서의 LASER 出力을 表示하고 p₀는 LASER 光의 最大出力을 나타낸다. 表 3은 6328Å He-Ne LASER 로 여러가

表 3. 水中傳播時的 減衰係數

試料	透過率(%/m)	減衰率(m ⁻¹)
증유수	69	0.37
수도물	62	0.48
바다물	67	0.40

지 水中에서 測定할 結果이다.

6. 結 論

序論에서 이야기한바와 같이 LASER 光을 利用한 光通信方式의 한 可能性을 위하여 本研究가 行해진 것이다.

光檢波方式으로는 在來의 直接光檢波方式을 利用했으며, 光電增倍管의 補助的인 電氣回路的 應答速度가 光速에 따르지 못하므로 機械的으로 초핑하여 檢波했다.

이 實驗의인 結果는 定量的인 解析을 하지 못했다. 또한 이測定을 위하여 使用한 平面鏡은 普通유리의 뒷면에 反射物質을 발른것으로 光의 完全反射는 不可能했으며 유리두께로 인한 光의 屈折에 관해서도 解析되지 않았다. 그러나 全測定值에 관한 減衰率에 同一하게 영향하는 것으로 假定할 수 있으므로 氣候條件에 의한 減衰傾向을 알 수 있었다.

또 1m 길이의 유리水曹속에 몇가지 물을 試料로 넣은 實驗에서도 앞의 경우와 같이 앞, 뒷면의 유리에 의한 光의 屈折을 考慮하지 않았고 다만 LASER 光의 세기를 測定하여 그 句配로 減衰係數를 구했다.

보다 精密한 測定裝置와 여러種類의 LASER 를 利用하면 보다 재미있는 結果를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- 1) H. Steinberg; "The use of a laser amplifier in a laser communication system", proc IEEE, 51, 6. p. 943. (Jun. 1963).
- 2) R. W. Engstrom, et. al. "Effects of Voltage-divider characteristics of multiplier photo tube response", Re. Sci. Instr. 28.7. (1957)
- 3) M. Ross; "LASER RECEIVERS" John-wiley. N. Y. (1966).
- 4) I. Goldstein; "Heterodyne measurements of light propagation through atmospheric turbulence; proc IEEE. Vol. 53. pp. 1172-1180, (Sept. 1965).
- 5) 양인웅, 김영권, "共振型結晶體變調器에 의한 레이저光變調" 電子工學會誌. Vol 7. No. 2. (1970. 8).