

光纖維 아나로그 映像信號 傳送에 對한 모달 노이즈 影響 (The Effects of Modal Noise on Fiber Optic Analog Video Transmission)

韓 致 文*, 崔 相 三*, 朴 漢 奎**

(Chi Moon Han, Sang Sam Choi and Han Kyu Park)

要 約

레이저 다이오드를 사용한 光纖維 아나로그 映像信號 傳送 시스템에서 기존 노이즈(shot, thermal noise 등) 이외에 光纖維內的 스페클 現象에 기인한 모달 노이즈를 確認하기 위하여 시스템 線型성의 degradation을 여러 種類의 光纖維에 따라 調査하고, 그 結果 다중 모드 光纖維 시스템에서 모달 노이즈 影響은 N.A(numerical aperture)와 core 半徑의 크기 및 帶域幅에 관계됨을 確認하였다. 모달 노이즈를 고려한 高品質 映像信號 傳送 시스템을 實現키 위한 方法으로는 單一 모드 光纖維를 使用하든지, 레이저 다이오드의 coherence time를 減少시킬 수 있는 變調技術을 開發해야 됨을 알았다.

Abstract

The effects of modal noise of analog video transmission systems using semiconductor laser diode is investigated.

The system linearity degradation due to modal noise is examined for various fiber types.

It was concluded that in analog video transmission systems using multimode fiber, modal noise is so serious that reduction of coherency is essential to the development and that single mode fibers are adequate for high quality analog video transmission systems.

I. 序 論

最近에 光纖維 通信 시스템에서 기존 노이즈(shot, thermal noise 등)와 관련되지 않는 새로운 노이즈가 發見된 바 있다.^[1]

특히 이 노이즈는 使用한 光纖維의 傳播特性 및 光原의 coherence 特性에 直接的인 관계가 있으며, 레이저 다이오드를 利用한 아나로그 映像信號 傳送은 레이저 다이오드의 넓은 變調帶域幅과 光纖維와 結合効

率이 良好하므로 구동 시스템이 比較的 簡單하기 때문에 매우 흥미를 끌고 있다.

그러나 레이저 다이오드를 利用한 아나로그 光傳送에서 두 가지 問題點이 지적되고 있다.^[2, 3]

하나는 光纖維內的 스페클(speckle) 現象이 光受信側에서 SNR 및 線型성(linearity)에 심한 影響을 주며, 이러한 現象을 모달 노이즈 혹은 스페클 노이즈라고 한다.

다른 하나는 光纖維나 結合器로부터 레이저 다이오드로 反사되어진 빛에 의해서 線型성을 저하시킨다.

本 論文에서는 반도체 레이저 다이오드를 使用한 아나로그 映像信號 傳送에서 모달 노이즈 影響을 검토하고, 光纖維의 種類에 따라 分析하였다.

*正會員, 韓國科學技術院 應用光學(研)
(Applied Optics Lab., KAIST)

**正會員, 延世大學校 工科學 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Yonsei Univ.)

다중 모드 光纖維內에서 스페클 現象은 傳播되는 모드들 사이의 干涉에 의해서 發生되며, 이러한 現象은 光纖維 断面에서 관측되어진다.^[1, 4]

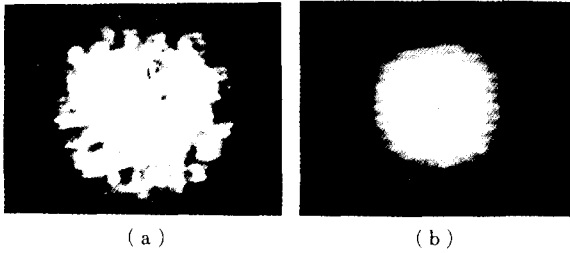


그림 1. 光纖維 断面에서 스페클 패턴

- (a) 길이 20m
 - (b) 길이 1km(λ_0 : 830nm, LD: NDL 3108)
- Fig. 1. Near field speckle pattern of (a) a 20m (b) a 1km graded index optical fiber. (λ_0 : 830nm, LD: NDL 3108)

아나로그 光傳送 시스템에서 레이저 다이오드를 光源으로 使用할 경우 spectral width는 매우 좁으므로, 光纖維의 外部 振動 및 주위 환경변화에 의해서 스페클 패턴은 상관관계를 가지면서 움직인다. 이때 光受信機에서 檢出된 信號振幅이 變하게 되며, 원래 信號를 歪曲시키는 노이즈로 作用한다.



그림 2. 光纖維 振動때문에 스페클 패턴의 움직임에 나타나는 진폭변조(50msec/div.)

Fig. 2. Amplitude fluctuation depends on speckle pattern of a graded index fiber vibration (50msec/div.).

레이저 다이오드의 주위 溫度 및 구동電流에 의해 발진 파장이 變하며, 이에 따른 스페클 패턴은 相關 관계를 가지면서 움직이기 때문에 光 檢出단에서는 리플(ripple) 주파수로 나타난다.^[5]

光纖維의 접속(splicing), 모드 scrambling 및 connector misalign 등과 같은 공간필터(spatial filtering)가(그림 3) 원인이 되어 光 檢出단에서는 intensity fluctuation으로 나타나며, 이러한 모든 요소들은 원래

의 信號를 歪曲시킨다.

이처럼 스페클에 의해서 發生한 不必要한 信號 성분들을 모달 노이즈라고 부르며, 映像信號 傳送시 얼마나 影響을 주는가를 다음 章에서 解析하기로 한다.

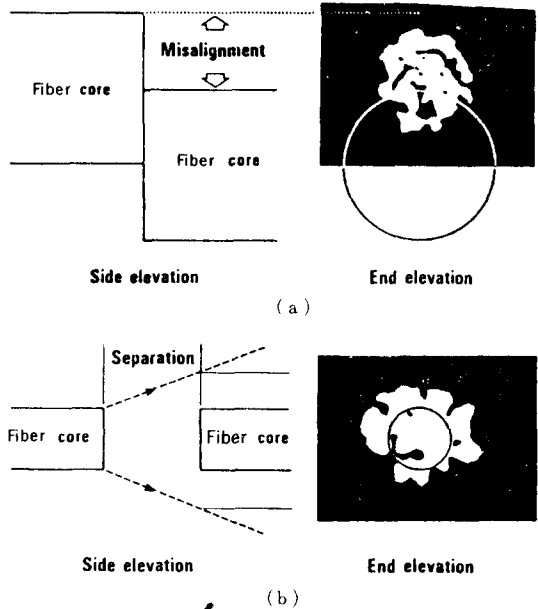


그림 3. 스페클 패턴의 影響 (a) 光纖維 콘넥터側 변위 (b) 光纖維 콘넥터 從 변위^[1]

Fig. 3. The effects of speckle pattern depend on (a) a longitudinal misaligned (b) a transverse separated optical fiber connector.^[1]

III. 모달 노이즈 解析 및 影響

다중 모드 光纖維內에서 스페클 패턴은 모드들 사이의 시간 지연 差異가 光源의 coherence time보다 짧을 때 傳播된 모드들 사이의 干涉에 의해서 發生한다. 그러므로 스페클 패턴은 光纖維의 種類, 特性 및 길이에 따라서 패턴 모양은 달라진다.^[1, 4]

光纖維 한 断面에서 스페클 패턴은 선편광된 各成分의 순시강도(instantaneous intensity)는 統計學的으로 ergodic process이며 지수 확률 밀도 함수를 가진다.^[5]

光纖維 断面積을 지나는 순시 電力 P_{tot} 의 확률 밀도 함수(p, d, f) $P(P_{tot})$ 의 characteristic function^[6]은

$$\phi(j\omega) = \prod_k \frac{1}{1 - j\omega \langle P_k \rangle^{2m_k}} \quad (1)$$

여기서 $\langle P_k \rangle$: k 번째 스페클에서 單一 편광성분의 평균전력 m_k : $\langle P_k \rangle$ 와 똑같은 값을 가지는 스페클 數이다.

식 (1)에서 평균(mean)과 分散(variance)를 구하면

$$\langle P_{tot} \rangle = \sum_k 2m_k \langle P_k \rangle \quad (2-a)$$

$$\sigma^2(P_{tot}) = \sum_k 2m_k [\langle P_k \rangle]^2 \quad (2-b)$$

이다.

光纖維內에서 radial position r 의 함수로 S/N비를 식 (3)과 같이 定義한다.

$$S/N = \frac{\langle P_{tot}(r) \rangle}{\sigma(P_{tot})} \quad (3)$$

光纖維의 굴절률 分布(index profile)는 식 (4)와 같이 나타낸다.

$$n(r) = n(0) \left[1 - 2 \Delta \left(\frac{r}{a} \right)^\alpha \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$\text{여기서 } \Delta = \frac{n^2(0) - n^2(a)}{2 n^2(0)} \approx \frac{n(0) - n(a)}{n(0)}$$

α : profile gradient

식 (1), (2), (3), (4) 및 참고문헌 [6]에서 S/N비는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S/N = \frac{\langle P_{tot}(r) \rangle}{\sigma(P_{tot})} = V \left[\frac{r^2}{2a^2} - \frac{(r/a)^{\alpha+2}}{\alpha+2} \right]^{1/2}$$

$$V = ak[n^2(0) - n^2(a)]^{1/2} \quad (5)$$

여기서 a : 光纖維 core의 半徑

$n(r)$: 光纖維 core 中心에서 r 인 지점의 굴절률

k : 傳播 상수

식 (5)는 光纖維內에서 스펙클 現象에 의한 S/N비를 나타내었으며, 光纖維 特性에 따라 變한다.

Graded index 光纖維($r=a$)에서 S/N비는 식 (6)으로 되며, 誘導된 모드 數가 增加할수록 S/N 비는 增加한다.

$$S/N = V \left[\frac{\alpha}{2(\alpha+2)} \right]^{1/2} = \sqrt{N} \quad (6)$$

여기서 N : 光纖維內에 誘導된 모드數

Step index 光纖維일 경우($\alpha=\infty$)는 식 (7)로

$$S/N = V \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{r}{a} \right) \quad (7)$$

되며, graded index 光纖維보다 모달 노이즈에 의한 S/N 비는 增加되고, 식 (5)을 도시하면 그림 4와 같다.

또 單一 모드 光纖維內에서는 單一 모드만 傳播되기

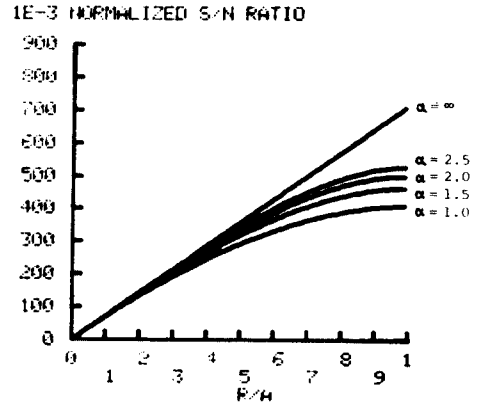


그림 4. r/a 의 비와 α 값의 변화에 대해서 정규화한 S/N비

Fig. 4. Normalized S/N ratio versus r/a with α parameter.

때문에 스펙클 패턴이 存在하지 않으므로 모달 노이즈 影響은 없다.

위의 事實을 종합하면 다음과 같은 結論을 내릴 수 있다.

- 1) 光纖維의 core 半徑 및 N.A가 크면 誘導되는 모드 數가 增加하므로^[9] 모달 노이즈 影響은 減少된다.
- 2) N.A 및 core의 半徑이 같을 때, graded index 光纖維가 step index 光纖維보다 모달 노이즈에 더욱 민감하다.
- 3) 單一 모드 光纖維內에서는 모달 노이즈 影響은 없다.

IV. 實驗方法 및 結果

모드 노이즈에 의한 아나로그 베이스밴드 映像傳送 시스템의 線形성을 微分利得(differential gain : DG) 및 微分位相(differential phase : DP)으로 測定하였다.^[7]

本 시스템은 日本 NEC (NDL 3108) 레이저 다이오드 (파장 : 830nm, 光出力 : -6dBm)를 使用하여 NTSC 칼라 映像信號를 傳送하였으며, 線形성을 고려하여 光檢出素子는 PIN 다이오드를 使用하였다.

그림 5, 6에 實驗方法을 나타내었으며, 그림 1의 스펙클 패턴은 그림 5의 方法으로 測定한 것이다.

本 시스템의 線形성은 표 1에 나타난 光纖維를 使用하여, 그림 6(a)의 方法으로 測定하였고, 그 結果를 그림 7, 8에 나타내었다. 그리고 LED(light emitting diode)를 光源으로 使用해서 測定한 結果는 DG

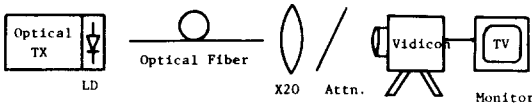


그림 5. 光纖維의 스페클 패턴 測定 개략도
 Fig. 5. Schematic diagram for the measurement of speckle output pattern of fiber.

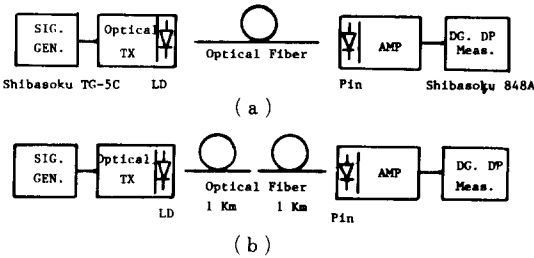


그림 6. (a) DG 및 DP 測定 개략도
 (b) 광섬유 側變位에 의한 DG 및 DP 測定 개략도

Fig. 6. Block diagram of (a) DG and DP measurement (b) versus a lateral offset fiber.

가 3.5(%), DP는 1.25(deg.)이었다.^[8]

그림 7의 結果에서 光纖維 2가 光纖維 3보다 DG는 1(%), DP는 0.3(deg.) 정도 더 影響을 받고 있음을 볼 수 있다. (평균 光出力 -6dBm에서)

이는 光纖維 2가 光纖維 3보다 帶域幅이 두배, 길이는 2/3배에 가깝기 때문에, 光纖維 3내에 傳播된 모

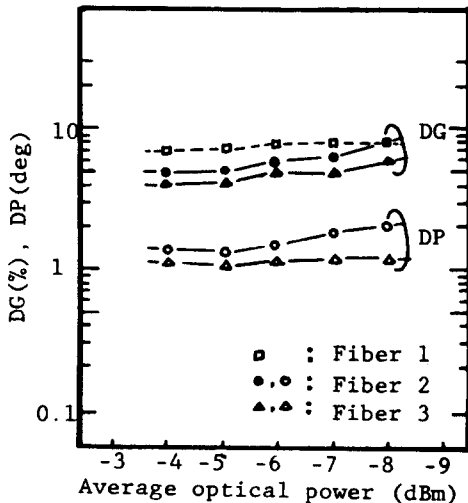


그림 7. Graded index 光纖維의 DG 및 DP 特性
 Fig. 7. DG and DP characteristics of graded index fiber output.

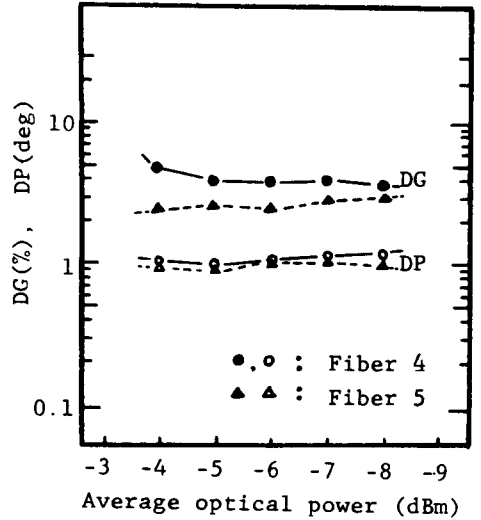


그림 8. 스텝 및 싱글 모드 光纖維의 DG 및 DP 特性
 Fig. 8. DG and DP characteristics of step index and single mode fiber output.

드들 사이의 시간 지연 差가 光纖維 2보다 크고, 사용한 레이저 다이오드의 coherence time에 더 빨리 가까워진다는 것을 意味한다.

그림 8은 step index 光纖維와 單一 모드 光纖維를 使用해서 測定한 結果이며 光纖維 5에서 DG가 2.5(%), DP는 1(deg.)이므로 (-6dBm 때), LED를 使用했을 때 보다 더 양호함을 보여 준다.

그러므로 單一 모드 光纖維를 使用하면 모달 노이즈에 의한 線型性的 degradation은 없다.

또 그림 8에서 광섬유 4 (step index)는 그림 7의 光纖維 2, 3 (graded index)보다 모달 노이즈에 의한 DG 및 DP가 減少되고 있음을 보여 주고 있으며, 이는 光纖維 내에서 傳播된 모드들 사이의 시간 지연差가 graded index 光纖維보다 step index 光纖維에서 더 길어지므로 빨리 光源의 coherence time에 가까워지기 때문이다.

光纖維 core의 半徑 및 N.A가 크면 誘導되어질 수 있는 모드의 數가 增加하므로^[9] 모달 노이즈에 의한 DG 및 DP의 影響은 減少될 것으로 기대된다.

光纖維 側變位에 의한 影響을 調査하기 위하여 길이가 1km인 光纖維를 (2개) 사용하였으며, 그림 6(b)의 方法으로 구성된 다음에 側으로 misalign 시켜가면서 測定하였다. 그 結果는 그림 9와 같다. 測定에 使用된 광섬유 特性은 표 1의 光纖維 2이다.

側으로 5μm 정도 misalign 되었을 때 DG는 2(%), DP는 1(deg.) 정도 影響을 받고 있으므로, 레이저 다이오드를 利用한 光傳送 시스템에서 光纖維의 接續, 콘

벡터 등과 같은 공간 필터에 의해서 線型성이 저하됨을 알 수 있다.

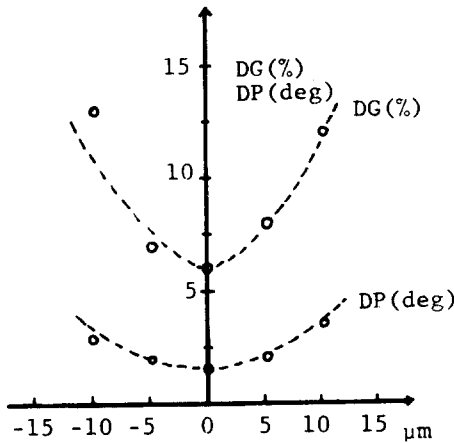


그림 9. 光纖維 側變位에 依한 DG 및 DP 特性
Fig. 9. DG and DP characteristics versus a lateral offset fiber.

표 1. 使用한 光纖維의 一般의 特性

Table 1. General characteristics of using optical fibers.

Fiber No.	Type No.	Loss (dB/km)	B. W. (MHz)	NA	Length (m)	Core Diameter (μm)	제조명
Fiber 1	Graded index	3.0	400	0.19	20	50	KAIST
Fiber 2	"	2.5	400	0.19	800	52	"
Fiber 3	"	2.7	220	2	1,100	50	"
Fiber 4	Step index	5.2	80	0.18	400	50	"
Fiber 5	Single mode				500	5	"

V. 結 論

實驗 結果에서 알 수 있듯이 레이저 다이오드를 使用한 아나로그 映像 情報 傳送 시스템에서 스펙클 現象에 依한 線型성의 degradation은 LED를 使用했을 때 보다 微分 利得에 對해서는 3~5(%) , 微分 位 相에 對해서는 0.5~1.5(deg.) 정도 影響을 받고 있다.

또 光纖維의 種類 및 持性에 따라 다르며, 光纖維 內에 傳播된 모드들 사이의 지연시간 差가 使用한 光源의 coherence time보다 짧은 한 模態 노이즈 影響을 받는다는 事實을 알 수 있었다.

레이저 다이오드를 利用한 아나로그 칼라 映像信號 傳送에서 良質의 화상을 얻기 위해서는 模態 노이즈를

고려해야 한다. 이 方法으로는 單一 모드 光纖維을 使用하면 模態 노이즈 影響은 減少시킬 수 있고, 레이저 다이오드의 coherence time를 줄일 수 있는 變調 方法을 채택하면 模態 노이즈 影響을 減少되리라고 기대된다.

參 考 文 獻

- [1] R.E. Epworth, "The phenomenon of modal noise in analog and digital fiber systems," *Proc. of the 4-th European Conf. Opt. Commun.*, pp. 492-501, 1978.
- [2] K. Asatani, K. Sato and H. Ishio, "Feasibility experiments on analog video transmission using a semiconductor laser diodes," *Proc. of the 5-th European Conf. Opt. Commun.*, Post Deadline Paper 16-18, 1979.
- [3] K. Asatani, K. Sato, "Linearity in fiber optic analog transmission systems using laser diodes," *The transaction of the IECE of Japan*, vol. E64, no.10, pp. 646-652, Oct. 1981.
- [4] B. Crosingnani, B. Daino, "Speckle pattern visibility of light transmitted through a multimode optical fiber," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 66, no. 11, pp. 1312-1313, Nov. 1976.
- [5] J.W. Goodman, *Speckle and Related Phenomena*, Edited by J.C. Dainty, 1975.
- [6] D. Daino, G. De Marchis and S. Piazzolla, "Speckle and modal noise in optical fibers theory and experiment," *Optica Acta*, vol. 27, no. 8, pp. 1151-1159, 1980.
- [7] J.R. Cavanaugh, A.M. Lessman "Subjective effects of differential gain and differential phase distortions in NTSC color television pictures," *J.Society of Motion Picture and Television Engineers*, vol. 80, pp. 614-619, 1971.
- [8] 한치문, 손성재 외 4명, "영상 정보 시스템 계획 방법 및 중, 수신기 개발에 관한 연구", 한국과학기술원 보고서, BSE 430-1268-4, 1979.
- [9] D. Gloge, "Weakly guiding fibers," *App. Optics*, vol. 10, no. 10, pp. 2252-2258, Oct. 1971. ***