《연구논문》 Korean Journal of Optics and Photonics, Volume 22, Number 1, February 2011 DOI: 10.3807/KJOP.2011.22.1.005

입사광의 크기 조절을 통한 경사굴절률 플라스틱 광섬유의 수치구경 측정기법

김대규[1] · 김보람[1] · 이병학[2] · 박승한[1†]

[1]연세대학교 물리학과
㊞ 120-749 서울시 서대문구 신촌동 134

[2]육군사관학교 물리학과
㊞ 139-799 서울시 노원구 공릉동 사서함 77

(2011년 1월 26일 받음, 2011년 1월 31일 수정본 받음, 2011년 2월 7일 게재 확정)

다중모드 경사굴절률 플라스틱 광섬유는 경사굴절률을 생성하기 위하여 첨가하는 미세입자, 불균일한 경사굴절률의 분포, 다른 모드 사이의 광학적인 간섭 등으로 인하여 스펙클 잡음이 크기 때문에, 광섬유 출력 단에서 방사되는 기하학적 광 세기 분포를 분석하여 측정하는 기존의 일반적인 수치구경 측정 방법으로는 수치구경 측정이 매우 어려운 문제점이 있다. 따라서 본 논문에서는 이와 같은 다중모드 경사굴절률 플라스틱 광섬유의 수치구경 측정을 위하여 입사 단에서 입사 광의 크기를 조절하여 수치구경을 구하는 새로운 방법을 제안하고, 이를 이용하여 플라스틱 광섬유의 수치구경을 측정하였다. 측정 결과, 기존의 방법으로 측정한 플라스틱 광섬유의 수치구경 값과 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있었으며, 제안한 기법이 출력 단에서 방사되는 광 세기 분포의 모호함을 배제할 수 있고 입력광의 입사 조건 및 광섬유 결합 효율을 최적화할 수 있는 장점이 있음을 알 수 있었다.

Measurement of Numerical Aperture of Graded-index Plastic Optical Fiber by Using a Variable Aperture

Dae-kyu Kim[1], Bo-Ram Kim[1], Byounghwak Lee[2], and Seung-Han Park[1†]

[1]*Department of Physics, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea*

[2]*Department of Physics and Chemistry, Korea Military Academy, Seoul 139-799, Korea*

(Received January 26, 2011; Revised manuscript January 31, 2011; Accepted February 7, 2011)

There are technical difficulties in measuring the numerical apertures of multi-mode gradient-index plastic optical fibers (GI-POFs) due to their strong speckle noise originating from dopants, non-uniformity of gradient-index profile, and multi-mode interference. Therefore, we propose a new method of obtaining the numerical aperture by controlling the size of the incident laser beam and measuring the numerical aperture of GI-POF. The results show that we can get a value for the numerical aperture of GI-POF very similar to that measured by the conventional method. We can also obtain the optimum launching condition of input beam and maximum coupling efficiency.

Keywords: Numerical aperture, Gradient-index plastic optical fiber, Speckles, Multi mode fiber
OCIS codes: (060.2270) Fiber characterization; (060.0060) Fiber optics and optical communications; (140.3510) Laser, fiber

I. 서 론

컴퓨터와 멀티미디어 및 인터넷 기술의 급속한 발전에 따라 우리사회가 요구하는 정보량은 최근 폭발적으로 증가하고 있다. 따라서 이러한 요구에 효과적으로 대비하기 위하여 최근 세계 각국에서는 자국의 국가 경쟁력 증대의 차원에서 초고속 정보 통신망의 구축을 지속적으로 추진하고 있다. 이러한 초고속 정보 통신망 구축의 핵심부품인 유리 광섬유(Glass Optical Fiber; GOF)는 신호 전송 대역폭이 커서 신호 전송 량이 많은 장점이 있으나, 쉽게 부러지며, 코어(core)의 직경이 작아 연결이 쉽지 않은 단점이 있다. 이와 같은 유리 광섬유의 단점을 극복할 가능성이 있는 실용적인 첨단 소재 중의 하나로 다중모드 플라스틱 광섬유(Plastic Optical Fiber: POF)가 있으며, 건물 내 근거리 통신망 구성을 위하여 국내

†E-mail: shpark@yonsei.ac.kr

외에서 많이 연구·개발되고 있다.[1, 2] 그러나 다중모드 플라스틱 광섬유에 대한 표준화된 규격이 아직 정립되지 않고 있으므로 적절한 특성 평가방법이나 측정기술의 개발이 매우 필요한 실정이다. 플라스틱 광섬유의 특성 평가 기술은 플라스틱 광섬유의 정확한 특성을 제시할 수 있을 뿐만 아니라, 사용 목적에 적합한 최적의 플라스틱 광섬유를 제작하고 개발하고자 할 때 필요한 정보를 제공할 수 있기 때문에 충분한 개발이 필요하다.

플라스틱 광섬유의 다양한 특성 중 수치구경(Numerical Aperture; N.A.)은 효율적인 광 세기 결합, 최적화된 대역폭 성능 발휘 등에 영향을 끼치는 중요한 측정 항목 중의 하나이다.[3-5] 그러나 다중모드 경사굴절률 플라스틱 광섬유(graded-index plastic optical fiber; GI-POF)는 경사굴절률을 생성하기 위하여 첨가하는 미세입자, 불균일한 경사굴절률의 분포, 다른 모드 사이의 광학적인 간섭 등으로 인하여 스펙클 잡음이 크기 때문에, 광섬유 출력 단에서 방사되는 기하학적 광 세기 분포를 분석하여 측정하는 기존의 일반적인 수치구경 측정 방법으로는 수치구경 측정이 매우 어려운 문제점이 있다. 따라서 본 논문에서는 이와 같은 다중모드 경사굴절률 플라스틱 광섬유의 수치구경 측정을 위하여 입사 단에서 입사 광의 크기를 조절하여 수치구경을 측정하는 새로운 방법을 제안하고, 이를 이용하여 플라스틱 광섬유의 수치구경을 측정하여 보았다. 새로운 방법을 이용하여 측정한 수치구경 값은 기존의 방법으로 측정한 플라스틱 광섬유의 수치구경 값과 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있었으며, 출력 단에서 방사되는 광 세기 분포의 모호함을 배제할 수 있고 입력광의 입사 조건 및 광섬유 결합 효율을 최적화할 수 있는 장점이 있음을 알 수 있었다.

II. 본 론

2.1. 기존의 수치구경 측정 방법

광섬유에서 수치구경은 코어와 클래딩의 굴절률 차이에 의해 광섬유 내에서 전반사가 일어나기 위해 입사시킬 수 있는 최대의 입사각을 의미한다. 기하적으로 코어와 클래딩의 굴절률을 이용하여 수치구경을 나타내면 다음과 같이 전개된다.[6]

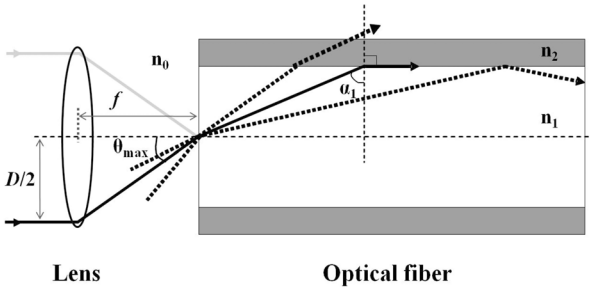

FIG. 1. Acceptance angle of plastic optical fiber.

$$N.A. = \sin\theta_{\max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1)$$

여기서 $\theta_{\max}$는 광섬유의 최대 수용 각이며, n_1과 n_2는 각각 코어와 클래딩의 굴절률이다.

수치구경의 측정 방법은 측정 원리에 근거하여 분류할 수가 있는데, Refracted Near Field technique (RNF), Near Field Pattern technique (NFP), Far Field Pattern technique (FFP) 등이 있다.[6] 일반적으로 광섬유의 수치구경의 측정을 위해 FFP법이 많이 이용된다. 일반적인 FFP법의 실험 구성은 그림 2와 같다. 이 방법은 레이저와 같은 단색광원을 상대적으로 큰 입사각으로 광섬유에 입사시키고, 출력 단에서 방사되는 광 세기 분포를 측정하여 수치구경 값을 구하는 방법이다. 즉, 출력 단의 광 세기 분포를 단순히 고전적인 광선의 개념으로 해석하고, 출력광의 방사각을 이동 거리에 따른 출력광의 mode field diameter(MFD)을 측정하여 수치구경 값을 구하는 방법이다.

단일모드 광섬유의 경우 코어의 직경이 수 μm 정도로 작으므로 원거리 장에서의 광 세기 분포를 회절 효과로 인한

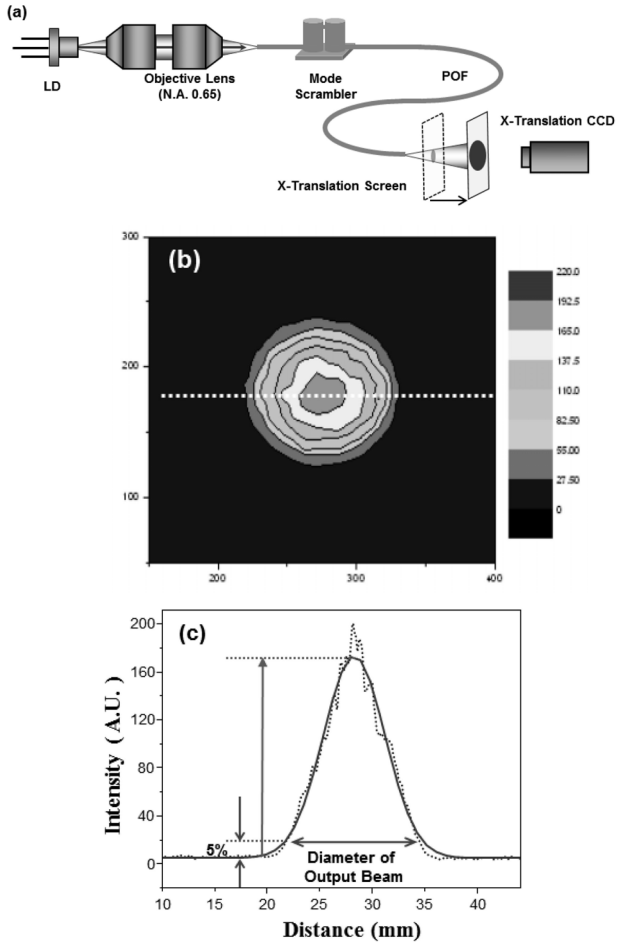

FIG. 2. (a) Far-field pattern technique for measurement of N.A. of plastic optical fiber, (b) Intensity profile of output beam in far-field and (c) determination of diameter of output beam.

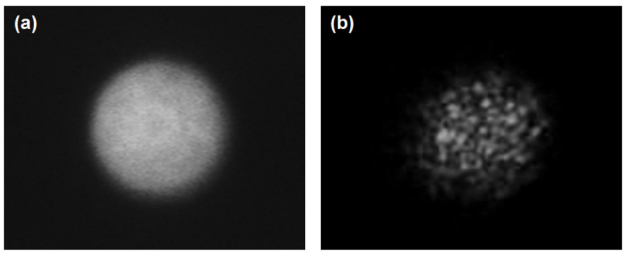

FIG. 3. Intensity profile of output beam from (a) SI-POF and (b) GI-POF.

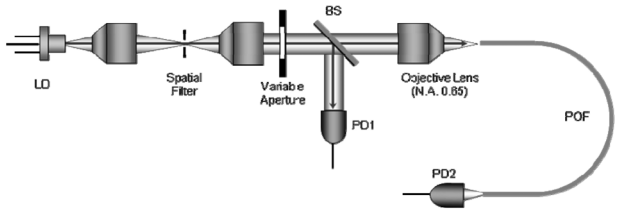

FIG. 4. Proposed method to measure numerical aperture of GI-POF.

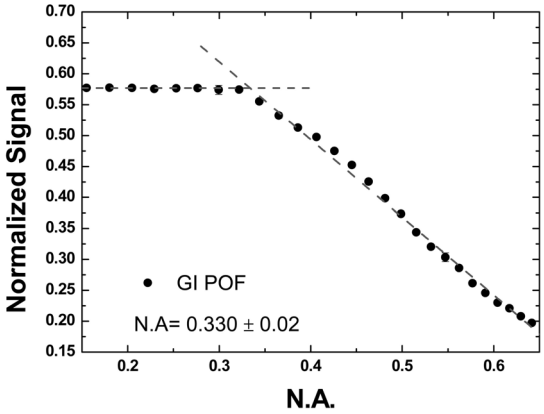

FIG. 5. Normalized output power from GI POF vs. numerical aperture.

가우시안 함수로 가정하고 가우시안 함수의 반치폭을 방사광의 직경으로 결정할 수 있다. 플라스틱 광섬유와 같은 다중모드의 경우에는 광섬유의 코어 직경이 커서 MFD를 일반적으로 출력세기 최대치의 $1/e^3$(5%)에 해당하는 값의 직경으로 사용한다.[6, 7] 그러나 출력 광 세기 최대치의 $1/e^3$에 해당하는 값은 배경 이미지 잡음에 따라 변할 수 있는 문제점을 가지게 된다. 따라서 상대적으로 짧은 광섬유에서 생길 수 있는 모든 모드를 발생하기 위해 모드 혼합기를 사용하며, 스크린과 카메라를 같은 마운트에 장착하여 동시에 이동할 수 있게 한다. 그림 2 (b)와 (c)는 일반적인 수치구경 측정 방법을 이용하여 얻은 광 세기 분포이다.

그림 2 (c)에서 볼 수 있듯이 다중모드 경사굴절률 플라스틱 광섬유는 경사굴절률을 생성하기 위하여 첨가하는 미세 입자, 불균일한 경사굴절률의 분포, 다른 모드 사이의 광학적인 간섭 등으로 인하여 스펙클 잡음이 크기 때문에, 광섬유 출력 단에서 방사되는 기하학적 광 세기 분포를 분석하여 측정하는 FFP 방법과 같은 기존의 일반적인 수치구경 측정 방법으로는 수치구경 측정이 매우 어려운 문제점이 있다. 특히 모드들 간의 중첩에 의한 스펙클 잡음은 광학 시스템에서 모드 군의 진행 속도가 변할 경우, 급속히 변하게 된다. 즉 광섬유를 구부리거나 특정 지점에 압력이 가해질 경우 불규칙적인 명암 분포 역시 수시로 변하게 된다. 이러한 급격한 모드 분포의 현상은 광섬유의 단면적의 광 세기 분포를 불규칙적으로 변하게 하는 원인이 되며 modal noise를 발생하게 한다.[8-10] 그림 3에서 볼 수 있듯이, 이러한 스펙클 패턴은 특히 다중모드 경사굴절률 플라스틱 광섬유의 경우가 계단형 굴절률 플라스틱 광섬유(step-index plastic optical fiber; SI-POF)의 경우에 비해 더 잘 나타내게 되는데, 이는 경사형 굴절률 플라스틱에서 상대적으로 적은 모드가 생성되기 때문이다. 따라서 경사형 굴절률 플라스틱 광섬유의 경우가 계단형 굴절률 플라스틱 광섬유의 경우 보다 방사각을 결정하기 더욱 어려우며, 다중 모드 플라스틱 광섬유의 수치구경 측정을 위해서는 출력광의 세기 분포를 이용한 측정 방법 대신에 새로운 측정 방법이 필요하다.

2.2. 제안한 수치구경 측정 방법 및 결과

그림 4는 제안한 수치구경 측정 방법의 개략도이다. 제안한 수치구경 측정 방법은 출력 단에서 방사되는 광 세기 분포의 모호함을 배제하고, 입사 단에서의 입사광의 직경을 직접적으로 조절하여 수치구경을 측정하는 방법이다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 입사광의 입사각을 점차 크게 조절하여 광섬유 내부로 빛을 입사시키고 출력 단에서 출력 광 세기를 측정하면 광섬유의 수치구경 한계에 의해 수치구경 보다 크게 입사되는 경우에 광 세기가 급격하게 변화하게 될 것을 예상할 수 있다.

제안한 수치구경 측정 방법을 다중모드 경사굴절률 플라스틱 광섬유의 수치구경 측정에 적용해 보기 위하여 레이저 다이오드의 출력 광을 Spatial filtering한 후 렌즈를 사용하여 평행 광을 만들었으며, 평행 광을 다시 대물렌즈를 통해 플라스틱 광섬유에 입사 시켰다. 이때 평행하게 전파하는 레이저 광에 대해 직경 조절이 가능한 조리개를 통해 입사광의 수치구경을 조정하였다. 입사광의 수치구경은 식 (1)으로부터 기하 광학적 관점에 따라 조리개의 직경과 대물렌즈 초점거리를 이용하여 아래와 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$N.A. = \sin\theta_{\max} = \frac{D/2}{\sqrt{f^2 + (D/2)^2}} \tag{2}$$

여기서 D와 f는 각각 조리개의 직경과 대물렌즈의 초점거리를 나타낸다. 본 실험에 사용한 대물렌즈는 0.65의 수치구경을 가지기 때문에 플라스틱 광섬유 끝 단으로 입사시킬 수

있는 입사광의 최대각은 0.65의 수치구경에 의해 결정되었으며, 대물렌즈로 입사시키는 레이저 광의 직경은 최대 6.3 mm로 제한되었다. 실험의 측정을 위해 조리개 구경의 크기를 일정하게 조절해가며 각각의 구경 크기에 대하여 광섬유 출력 단의 광량과 입사하는 광량을 기록하였으며, 출력 광량을 입사 광량으로 나누어 규격화하였다. 규격화한 광량을 통해 플라스틱 광섬유의 수치구경에 의한 광량의 변화를 쉽게 관측할 수 있었다. 실험에 사용된 플라스틱 광섬유는 상용화된 계단형 굴절률 플라스틱 광섬유와 경사형 굴절률 플라스틱 광섬유를 사용하였다. 플라스틱 광섬유의 코어 재료인 PMMA의 투과 파장영역인 650 nm 광원을 이용하기 위해 광원으로 InGaAlP 650 nm 레이저 다이오드를 사용하였다.

그림 5는 다중모드 경사굴절률 플라스틱 광섬유를 측정한 결과이다. 입사광의 입사각(수치구경)이 비교적 작은 영역에서는 규격화한 출력 광량이 일정하게 유지되고, 광섬유의 수치구경 이상의 입사각을 갖는 입사광에 대해서는 입사각에 따라 출력 광량이 완만하게 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이는 다중모드 경사굴절률 플라스틱 광섬유의 경우 모드에 따른 광 전파 경로의 길이가 비슷하고 외부 환경에 대해 고차 모드의 광선도 비교적 큰 손실 없이 안정적으로 도파되기 때문으로 생각된다.

실험 결과로부터 수치구경을 구하기 위해서 입사광의 입사각에 따라 수치구경이 작은 부분과 큰 부분을 나누어 각각 선형 추세선을 그렸으며, 교차점을 위치를 통해 광섬유의 수치구경을 예상할 수 있었다. 추세선의 분석을 통하여 다중모드 경사굴절률 플라스틱 광섬유의 수치구경은 0.330±0.02임을 알 수 있었다. 오차는 측정된 추세선의 표준편차를 이용하여 산출하였다.

2.3. FFP방법에 의한 수치구경 결과 및 비교

제안한 수치구경 측정 기술과 기존의 수치구경 측정 기술을 비교하기 위하여 일반적으로 사용되는 FFP법을 이용하여 앞에서 측정한 다중모드 경사굴절률 플라스틱 광섬유의 수치구경을 측정하였다. 특히 경사굴절률 플라스틱 광섬유 내부에 모드들이 균일하게 발생할 수 있도록 그림 2와 같이 외부자극에 둔감한 계단형 굴절률 플라스틱 광섬유를 모드 혼합기에 10번 이상 감고 경사형 굴절률 플라스틱 광섬유와 결합하여 측정하였다. 그림 6은 기존의 FFP 방법으로 측정한 결과를 보여주고 있다. 플라스틱 광섬유의 출력광의 직경이 출력단과 스크린 사이의 거리에 따라 선형적으로 증가하는 볼 수 있었다. 선형 맞춤을 통하여 구한 기울기로부터 다중모드 경사굴절률 플라스틱 광섬유의 수치구경을 구한 결과 수치구경 값은 0.307±0.02 이었다. 따라서 기존의 FFP 측정 방법을 이용하여 구한 수치구경 값은 제안한 방법으로 구한 수치구경 값인 0.330±0.02 와는 다소 차이 나기는 하지만 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 첨가 미세입자, 불균일한 경사굴절률의 분포, 다른 모드 사이의 광학적인 간섭 등으로 인한 스펙클 잡음 때문으로 생각된다.

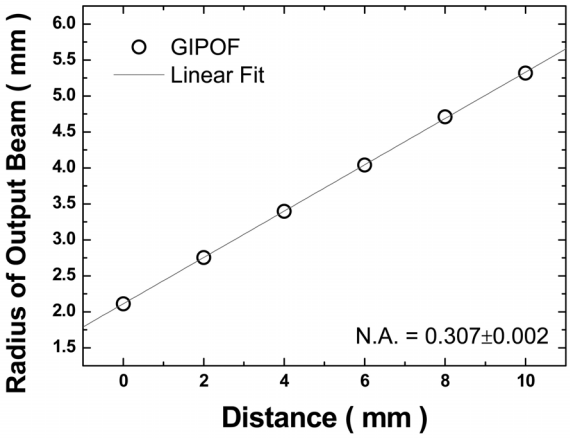

FIG. 6. Radius of far-field output beam from GI POF vs. distance between GI-POF and screen.

III. 결 론

본 논문에서는 스펙클 잡음이 심한 플라스틱 광섬유의 수치구경 측정을 위한 새로운 측정 방법을 제안하고, 다중모드 경사굴절률 플라스틱 광섬유의 수치구경을 측정해 보았다. 또한 제안한 측정 방법을 통하여 구한 다중모드 경사굴절률 플라스틱 광섬유의 수치구경 측정 결과는 기존의 FFP 방법을 통하여 구한 수치구경 측정결과와 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 따라서 제안한 수치구경 측정 방법은 스펙클 잡음과 같은 출력 단에서 방사되는 광 세기 분포의 모호함을 배제할 수 있음은 물론 광섬유 결합 효율을 최적화할 수 있는 입력광의 입사 조건을 동시에 구할 수 있는 장점이 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 2단계 두뇌한국 21(BK21) 사업과 미래유망 융합기술 파이오니어 사업(2010-0002211)으로부터 지원받아 수행되었습니다.

References

1. J. Zubia and J. Arrue, “Plastic optical fibers: an introduction to their technological processes and applications,” Optical Fiber Technology **7**, 101-140 (2001).
2. I. Möllers, D. Jäger, R. Gaudino, A. Nocivelli, H. Kragl, O. Ziemann, N. Weber, T. Koonen, C. Lezzi, A. Bluschke, and S. Randel, “Plastic optical fiber technology for reliable home networking: overview and results of the EU project POF-ALL,” IEEE Comm. Mag. **47**, 58-68 (2009).
3. G. Jiang, R. F. Shi, and A. F. Garito, “Mode coupling and equilibrium mode distribution conditions in plastic optical fibers,” IEEE Photon. Technol. Lett. **9**, 1128-1130 (1997).
4. S. Savović and A. Djordjevich, “Influence of numerical

aperture on mode coupling in step index plastic optical fibers," Appl. Opt. **43**, 5542-5546 (2004).
5. T. Ishigure, A. Horibe, E. Nihei, and Y. Koike, "High-bandwidth, high numerical aperture graded-index polymer optical fiber," J. Lightwave Technol. **13**, 1686-1691 (1995).
6. W. Daum, J. Krauser, P. E. Zamzow, and O. Ziemann, *POF-polymer Optical Fibers for Data Communication* (Springer-Verlag, Berlin, Germany, 2002), pp. 3-19, 277-293.
7. ITU-T Study Group 15, "Revised verised of recommendation G.651-characteristics of 50/125um multimode graded index optical fiber cable," ITU-T, Feb (1998).
8. G. C. Papen and G. M. Murphy, "Modal noise in multimode fibers under restricted launch conditions," J. Lightwave Technol. **17**, 817-822 (1999).
9. T. H. Wood, "Actual modal power distributions in multimode optical fibers and their effect on modal noise," Opt. Lett. **9**, 102 (1984).
10. T. H. Wood and L. A. Ewell, "Increased received power and decreased modal noise by preferential excitation of low-order modes in multimode optical fiber transmission systems," J. Lightwave Technol. **LT-4**, 391 (1986).