

광섬유 출력 측정용 광검출기의 비선형성 평가 연구

이덕희 · 류지욱

공주대학교 응용물리학과

Ⓣ 314-701 충남 공주시 신관동 182번지

서정철*

한국표준과학연구원 정보통신표준센터

Ⓣ 305-600 대전 유성구 도룡동 1번지

(2004년 1월 29일 받음, 2004년 6월 4일 수정본 받음)

광통신 출력 측정용 광검출기의 비선형성 특성을 측정하기 위하여 광합산 방법을 이용한 비선형성 측정 장치를 구성하였다. KRISS 출력 소급성을 갖는 고출력용 광검출기와 저출력용 광검출기의 비선형성을 측정하였는데, 50 dB의 작동영역에서 각 검출기의 비선형성은 0.01% 및 0.02% 이내로 측정되었다. 이 광검출기들은 선형성이 우수하므로 광섬유 광특성 측정 분야에서 KRISS 표준기로 사용되고 있다.

주제어 : Metrology, Photodetectors, Fiber measurements.

I. 서 론

최근들어 인터넷 수요의 폭발적인 증가에 따라 대용량으로 정보를 전달할 수 있는 광섬유를 이용한 초고속 대용량 광통신 기술이 개발되었다. 또한 광통신 시스템의 정보 전달 효율과 신뢰도 향상을 위해 광통신 측정 표준을 확립하기 위한 연구가 NIST(미국립표준기술연구원), NPL(영국물리연구소) 등과 같은 선진 표준 연구기관을 중심으로 활발하게 진행되고 있다. 한편 최근 들어 국내의 광통신 관련 업체에서는 광통신 관련 측정량의 측정 신뢰성 향상의 중요성을 인식하게 되었다. 그러나 아직까지 광통신 국가 측정 표준이 확립되어 있지 않으므로 측정 소급성(traceability)을 유지하는데 많은 어려움이 있는 실정이다.^[1,2]

광통신 측정 기술은 크게 광검출기 측정 표준, 광원 측정 표준, 광섬유 특성 평가 기술로 나눌 수 있다. 광통신용 광검출기의 특성에는 비선형성(nonlinearity), 분광감응특성(spectral responsivity), 시간 반응 특성(time responsivity), 공간균일특성(spatial homogeneity), 안정성(stability), 편광 의존성(polarization dependence) 등이 있다.^[3] 광검출기의 비선형성 특성은 광검출기의 감응도(responsivity)가 광원의 세기에 일정하지 않은 현상으로 광섬유의 손실(optical attenuation), 반사 손실(return loss) 및 증폭기의 이득률(gain) 등을 측정할 때 측정 세기에 따라서 결과가 다르게 나타날 수 있다. 그러므로 광검출기의 비선형성 특성은 광섬유의 특성 평가에 있어서 측정 정확도에 크게 영향을 미치기 때문에 반드시 측정해야 한다.^[4-8] 또한 광검출기의 절대 출력 측정이나 교정(calibration)은 특정

출력에서 측정을 하는데 이것을 전체 작동영역으로 확장하기 위해서는 광검출기의 비선형성 측정이 필요하다.^[1,2]

본 논문에서는 광섬유 광특성 측정 국가 표준을 확립하기 위하여 파장 가변 레이저 다이오드 광원과 광감쇠기(optical attenuator), 편광 조절기(polarization controller) 등을 이용한 광검출기 비선형 특성 측정 장치를 구성하였으며, 고출력용 광검출기, 저출력용 광검출기, InGaAs 센서 등의 비선형성을 측정하였다. 이 광검출기들은 선형성이 우수하므로 광섬유 측정에서 기준 광출력장치(standard optical power meter)로 사용된다.

II. 비선형성 측정 장치

광의 출력 측정에서 일반적으로 광검출기의 input 출력에 비례하여 output 출력으로 측정되는데, 이 비례가 출력에 따라서 일정한 관계를 갖고 있으면 선형적이라 하고, 비례관계에서 벗어나는 경우를 비선형적이라고 한다. 즉 임의의 출력에서 감응도와 기준 출력에서 감응도의 차이를 비선형성이라고 정의한다.^[9] 그림 1은 input 출력에 대해서 output 출력의 변화를 보여주는 광검출기의 감응도 곡선을 나타내는 것으로 비선형성은 식 (1)과 같다.^[10-13]

$$\text{Nonlinearity} = \frac{R(P) - R(P_c)}{R(P_c)} \quad (1)$$

여기서 R(P)는 임의의 Input 출력 P에서 광검출기의 감응도이고, R(P_c)는 기준 출력 P_c에서 광검출기의 감응도이다. 이와 같은 광검출기의 비선형성은 일반적으로 낮은 출력에서는 잡음으로 인한 비선형성이 나타나고, 중간 출력에서는

* E-mail: seo@kriss.re.kr

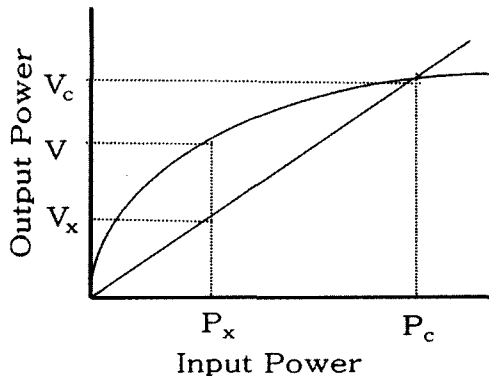


그림 1. 광검출기의 출력에 따른 감응도 곡선.

감응도가 증가하는 superlinearity 및 고출력에서는 감응도가 감소하는 saturation 형태가 나타난다.^[3]

한편 비선형 특성을 측정하기 위한 방법에는 두 부류로 나눌 수 있다. 하나는 의존형 방법(dependent method)이고 또 하나는 독립형 방법(independent method)이다. 의존형 방법은 검출기의 출력값 외에 또다른 물리적인 양을 항상 알고 있어야 하는 방법으로 이 부류에 속하는 전형적인 방법으로는 광원의 역계급법칙을 이용하는 방법, 투과율을 알고 있는 필터를 이용하는 방법(the attenuation method) 등이 있다.^[10] 광합산 방법과 같은 독립형 방법은 단지 출력 측정으로 비선형성을 알아낼 수 있는 것으로, 별도의 표준이 필요치 않은 자체 교정 방법으로 정확도가 높기 때문에 1차 표준기관에서 비선형성 측정 방법으로 가장 많이 이용하고 있다. 또한 여러 가지 변형된 방법들도 많이 제시되고 있는데 각각의 측정 방법에 따라 장단점이 있으므로 실험장비의 설치나 종류에 따라 적합한 방법을 선택하게 된다.^[13]

한편 광섬유의 손실, 반사 손실, 증폭기의 이득률 측정 등은 광검출기의 비선형성에 크게 의존하며, 강한 파장 의존성을 가지므로, 넓은 파장 영역에서 높은 정확도로 광검출기의 비선형성을 측정해야 된다.

본 연구에서는 그림 2와 같이 광합산 방법을 이용하여 넓

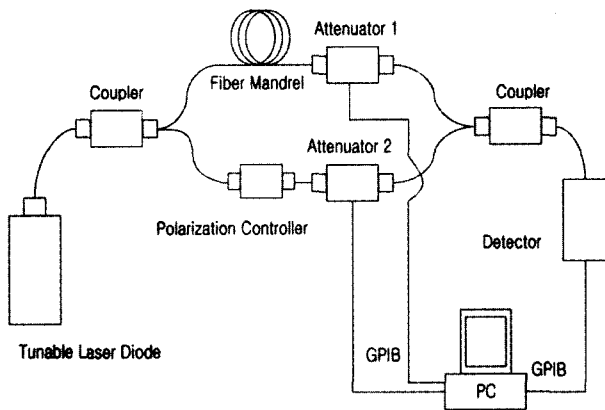


그림 2. 광합산 방법을 이용한 비선형성 측정 장치도.

은 파장 영역에서 광섬유 출력계의 비선형성을 측정하기 위한 실험 장치를 구성하였다.

광원은 파장 가변 레이저 다이오드(NewFocus 6300)를 사용하였는데 파장 영역은 1520 nm~1570 nm이다. 커플러(50:50)를 사용하여 광을 분할하고 감쇠기(Agilent 8163A, 81561A) 1, 2로 보낸 후 각각의 감쇠기에서 나온 광을 커플러(50:50)로 모으게 된다. 두 대의 감쇠기에서 나온 빛이 커플러에서 합쳐지면 간섭을 일으키므로 간섭효과를 제거하기 위해서 감쇠기 2에 편광 조절기(Agilent 11896A)를 사용하여 편광 상태를 조절하였고 감쇠기 1의 앞단에 10 km fiber를 연결하여 시간 지연(time delay)이 되도록 하였다.

한편 광합산 방법에 의한 비선형성 측정에 있어서 측정 불확도 요인은 광원의 안정성(source stability), 편광 의존성(polarization dependence), 반복 특성(repeatability) 등이 있는데, 일반적으로 광원의 안정성이 가장 측정 정확도에 영향을 준다. 광원의 안정성을 측정하기 위해서 레이저 controller에서 출력 세기를 연속적으로 변화시키고, 각 출력에서 1시간 이상 작동하면서 세기를 측정하였다. 레이저의 출력 부분에 광섬유 커넥터가 부착되어 있으며, optical isolator가 설치되어 있어 광원의 안정도가 향상되도록 하였다. 그림 3은 광원의 안정성을 측정한 것으로 레이저 controller의 출력이 3 mW~9 mW에서 출력변화가 0.1% 이내로 높은 안정성을 보였다.

한편 광출력을 정확하게 측정하기 위하여 국가 출력 측정의 소급성을 갖는 KRISS 광섬유 출력 표준기로부터 광검출기 A, B를 교정하였다. 0.1 mW의 출력에서 교정계수를 측정했는데, 이때 광검출기 A의 교정계수는 1310 nm에서 0.982, 1550 nm에서 0.987이며, 광검출기 B의 교정계수는 1310 nm에서 1.154, 1550 nm에서 1.137로 측정이 되었다. 이와 같은 교정계수는 레이저 광원을 KRISS 출력 표준기와 피교정 검출기에 교대로 입사하여 출력을 비교하여 측정하게 되는데, 교정계수는 피교정 검출기에서 측정된 신호 값으로 출력 표준기의 출력값을 나누어 계산하게 된다. 이와 같은 교정계수는 검출기에서 측정된 출력에 교정계수를 곱하

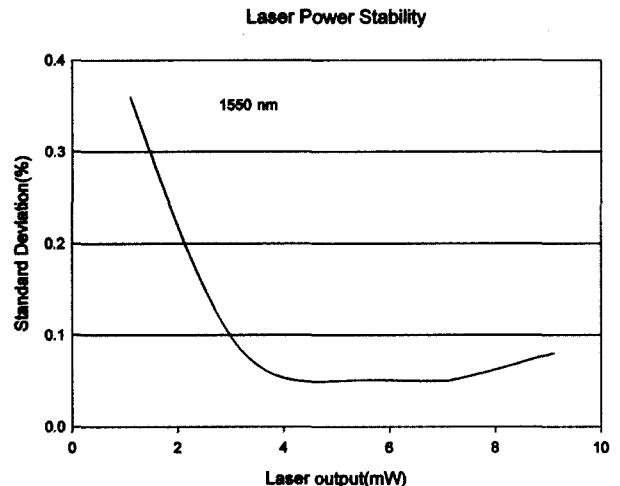


그림 3. 광원의 출력에 따른 안정도 변화.

여 레이저 광원의 실제 출력을 얻는데 이용된다.

한편 그림 2의 장치에서 검출기의 dark 측정은 감쇠기 1과 감쇠기 2의 셔터를 모두 닫은 상태에서 측정하게 되는데, 이 값을 각각의 측정값에서 빼게 되면 순수한 신호값만을 얻을 수 있게 된다. 측정 순서는 셔터 1을 열고 셔터 2를 닫은 상태에서 검출기의 값을 읽고(S_a), 그 다음은 반대로 셔터 1을 닫고 셔터 2를 열고 검출기의 값을 읽어서(S_b), 두 값을 더 하여($S_a + S_b$)를 계산한다. 그 다음에 셔터 1과 2를 모두 열은 상태에서 검출기의 값을 읽은 후(S_c), ($S_a + S_b$)의 값과 (S_c)의 값을 비교하여 비선형성을 구한다. 이때의 비선형 감응도 함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[14]

$$\text{Nonlinearity}(S_c) = \frac{S_c - (S_a + S_b)}{(S_a + S_b)} = \frac{S_c}{(S_a + S_b)} - 1 \quad (2)$$

한편 감쇠기를 조절하여 출력을 2 dB 씩 60 dB 까지 줄여 가며 이와같은 과정을 반복하여 연속적인 세기에 대한 비선형성을 측정하게 된다. 감쇠기와 검출기는 컴퓨터와 연결하여 감쇠기의 셔터와 감쇠량을 자동으로 조절하게 된다. 이와 같은 실험 장치를 이용하여 고출력 용 광검출기 A(Newport 818-IS-1), 저출력용 광검출기 B(Newport 818-FA)와 InGaAs 검출기 C 등의 광섬유 특성 측정용 검출기의 비선형성을 측정하게 된다.

III. 실험 및 결과

그림 4는 1550 nm에서 고출력용 광검출기 A(Newport 818-IS-1)의 비선형성을 보여주는 것으로, 출력이 0.05 μW 이상일 때는 비선형성이 0.01% 이내로 우수하지만 0.05 μW 이하의 저출력에서는 신호 잡음에 의한 비선형성이 나타남을 알 수 있다. 출력이 0.01 μW 이하에서 비선형성은 0.05% 정도이며, 0.001 μW 이하에서 1.5%까지 출력이 낮아질수록 비선형성이 증가하였다.

그림 5는 저출력용 광검출기 B(Newport 818-FA)의 비선형성을 보여주고 있는데, 출력이 0.1 mW 이하에서는 비선형성이 0.02% 이내로 양호한 선형성을 보여주고 있다. 한편 출력이 0.1 mW 이상인 경우에는 비정상적인 감응 특성에 의해서 비선형성이 0.5% 이상으로 크게 증가하게 된다.

그림 6은 광검출기 C의 비선형성 측정 결과를 보여주고 있다. 이 광검출기는 적분기가 부착된 Hamamatsu 사의 InGaAs 광검출기인데, 적분구 타입의 광검출기는 광섬유 출력 측정에서 다중반사, 개구수(numerical aperture), 편광에 의존하지 않고 출력을 측정할 수 있는 광검출기이다. 광검출기 C의 신호는 전류계(amperemeter)로 측정하였는데, 측정 영역에서 균일하게 0.02% 이내의 비선형성을 가지고 있음을 알 수 있었다.

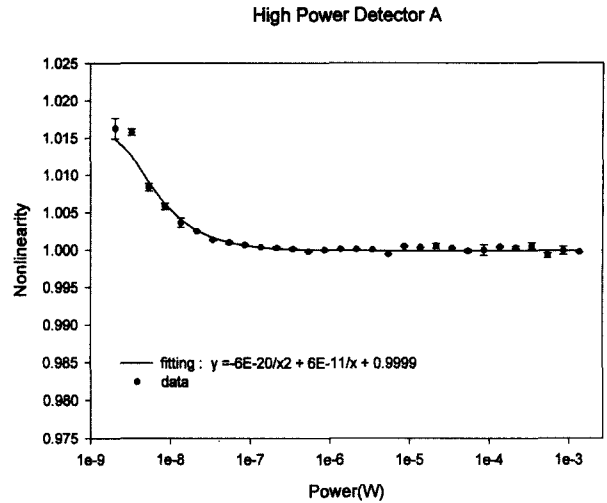


그림 4. 고출력 광검출기의 비선형성 특성.

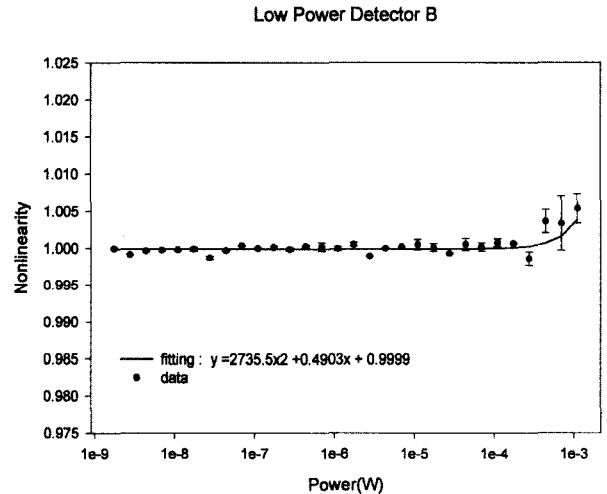


그림 5. 저출력 광검출기의 비선형성 특성.

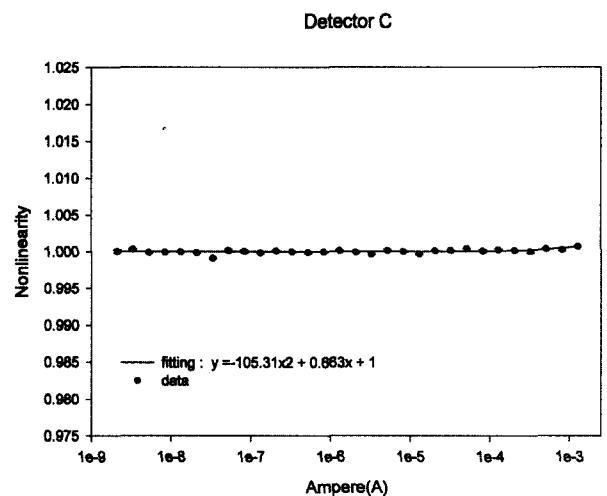


그림 6. InGaAs 검출기의 비선형성 특성.

IV. 결 론

본 논문에서는 광섬유 출력 측정용 광검출기의 비선형성을 측정하기 위한 장치를 구성하였는데 레이저와 커플러, 편광 조절기, 감쇠기, 데이터 수집 및 처리 장치 등으로 구성되었다. 광섬유 출력 측정에 사용되는 고출력용 광검출기, 저출력용 광검출기 및 InGaAs 검출기의 비선형성을 측정하였는데, 광검출기들의 비선형성이 작동 영역에서 0.02% 이내로 측정되었다. 이 검출기들은 비선형성이 우수하므로 광섬유의 길이, 손실, 반사 손실 등 광섬유 측정용 기준 광검출기로 사용할 수 있다. 또한 이 측정 장치는 반사 손실 측정기 등과 같은 광섬유 특성 출력 장치의 비선형성을 측정하는데 사용하게 된다.

참고문헌

- [1] 이인원 등, 정보통신 측정표준기술 개발, KRISS/IR-2002-013, 2001.
- [2] 이인원 등, 측정표준 분야확대, KRISS/IR-2003-018, 2002.
- [3] Dennis Derickson, Fiber Optic Test and Measurement, (Prentice Hall PTR, New Jersey, USA, 1998), Chapter 2.
- [4] A. Thompson and H.-M. Chen, "Beamcon III, a linearity measurement instrument for optical detectors", *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, vol. 99, no. 6, pp. 751-755, 1994.
- [5] L. Coslovi and F. Righini, "Fast determination of the nonlinearity of photodetectors", *Appl. Opt.*, vol. 19, no. 18, pp. 3200-3203, 1980.
- [6] R. D. Saunders and J. B. Shumaker, "Automated radiometric linearity tester", *Appl. Opt.*, vol. 23, no. 20, pp. 3504-3506, 1984.
- [7] C. L. Sanders, "Accurate measurements and corrections for nonlinearities in radiometers", *J. Res. Nat. Bur. Stand. (U.S.)* 76B, pp. 437-453, 1972.
- [8] R. G. Frehlich, "Estimation of the nonlinearity of a photodetector", *Applied Optics*, vol. 31, no. 28, pp. 5926-5929, 1992.
- [9] "Calibration of fiber optic power meters", Draft International Standard, IEC TC 86, 1992.
- [10] Shao Yang, Igor Vayshenker, Xiaoyu Li, Thomas R. Scott, "Optical Detector Nonlinearity : Simulation", *NIST Technical noet 1376*, May 19, 1995.
- [11] Shao Yang, Igor Vayshenker, Xiaoyu Li, Thomas R. Scott, "Nonlinearity of optical fiber meters", *NIST Special Publication*, no. 950, pp. 101-104, 1996.
- [12] Shao Yang, Igor Vayshenker, Xiaoyu Li, Thomas R. Scott, "Automated measurement of nonlinearity of optical fiber power meters", *Proc. SPIE* vol. 2550, pp.12-19, 1995.
- [13] Yan, S, I. Vayshenker, et al. "optical detector nonlinearity: a comparison of five methods", Conference on Precision Electromagnetic Measurements, pp. 455-456, 1994.
- [14] 서정철 등, "분광복사휘도 측정용 광검출기의 특성 평가", *한국광학회지*, vol. 12, no. 5, pp. 376-381, 2001.

Nonlinear characteristics of photodetectors for optical fiber power measurements

Duck Hee Lee and Ji-Wook Ryu

Department of Applied Physics, Kongju National University, Kongju 314-701, Korea

Jung-Chul Seo[†]

Center for Information and Telecommunication Standards,
Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon 305-600, Korea

[†]E-mail: seo@kriss.re.kr

(Received January 29, 2004, Revised manuscript June 4, 2004)

We have composed an experimental system using the superposition method to measure the nonlinearity of photodetectors for optical fiber power measurements. Also we have measured the nonlinearity of a high power detector and of a low power detector. The two detectors have shown good linearity within 0.01% and 0.02% , respectively, in the 50 dB dynamic range. These detectors are used as reference detectors in optical fiber characteristics measurements.

OCIS Codes : 120.3940, 040.5160, 060.2300.