

# 전치왜곡기를 이용한 Mach-Zehnder 광변조기의 비선형 왜곡 보상

이용구, 서규재, 반재경, 정용채  
전북대학교 전자정보공학부

(Tel)063-270-2397, (Fax)063-270-2394

## Nonlinear distortion compensation of Mach-Zehnder optical modulator using predistortor

Yong Gu Lee, Gyu Jae Seo, Jae Kyung Pan, Yong Chae Jeong

School of Electronics and Information Engineering, Chonbuk National University

pan@moak.chonbuk.ac.kr

**Abstract** Linearization of Mach-Zehnder optical modulator using electrical predistortor is reported. Two-tone experiments have shown a nearly 19dB (@ $P_o = -33.6\text{dBm}$ ) reduction in third-order intermodulation product (IMP3) at 1.8975 GHz and 1.9025 GHz. In an experimental link with a noise floor of  $-92\text{dBm}$ , the spurious free dynamic range (SFDR) is improved by 7dB.

### I. 서론

다중신호를 전송하는 SCM(subcarrier multiplexing) 광전송 시스템은 아날로그 신호의 전송방법으로 반도체 레이저를 이용한 직접 변조 방식과 외부 광원과 외부 변조기를 이용한 외부 변조 방식을 사용한다. 이중 외부 변조 방식은 변조기의 바이어스가 quadrature 점일 때 짝수 차수의 혼변조 신호를 제거할 수 있고, 처핑에 의해 발생할 수 있는 색분산을 감소시킬 수 있는 장점이 있다.[1-2] 그러나 Mach-Zehnder 광변조기 고유의 전달함수 특성에 의해 다중의 SCM 신호 전송시 발생하는 다수의 IMP3가 시스템 성능을 제한한다. IMP3는 주신호와 인접해 있어 필터를 통해 제거하기가 쉽지 않다. 주신호와 인접한 IMP3는 cross-talk 또는 잡음으로 작용해 신호의 품질을 저하시키고, 시스템의 성능을 저하시

킨다. 따라서 광변조기를 이용한 아날로그 광통신 시스템은 광변조기의 비선형 특성에 의해 그 동적 동작 범위에 제한을 받는다.

Mach-Zehnder 광변조기의 선형성을 개선하여 동적 동작 범위를 넓히기 위해 많은 다양한 방법들이 연구되었다. 광학 영역에서의 선형화 방법으로 두 개의 Mach-Zehnder 간섭계를 하나의 기판 위에 parallel이나 series로 배열하고 입력되는 RF 신호 전력과 광전력의 비나 입력되는 RF 신호의 전력비와 DC 바이어스를 조절하여 변조기의 선형성을 향상시키는 연구가 이루어졌다.[3] 이러한 선형화 방법은 광변조기의 광대역 변조 특성을 이용할 수 있다는 장점이 있지만 엄격한 광원을 요구하는 특성과 설계 제작시 어려움이 있다.

RF 회로를 이용한 선형화 방법으로 feedforward와 전치왜곡기를 이용하여 선형화 방법이 있다. Feedforward 선형화 방법은 비선형 변조된 광의 일부를 분리하여 3차 혼변조 신호를 추출하여 다시 광변조시켜 비선형 변조된 광신호와 결합하여 선형성을 향상시키는 방법으로 선형성은 뛰어나나 부가 회로에 의한 비용이 증가하고 넓은 용적을 필요로 한다.

전치왜곡기를 이용한 방법은 PIN 다이오드나 CMOS를 이용하여 Mach-Zehnder 광변조기의 전달 함수와 역 전달 함수를 갖는 회로를 이용하여 광변조기에 전치왜곡된 RF 신호를 인가하여 출력 단의 선형성을 증가시키는 방법이다.[4-5] 전치왜곡 선형화 방법은 feedforward 선형화 방법 보다 선형성 개선은 적지만 구조가 간단해 구현하기 쉽고 비용도 적어 많이 이용되고 있다.

본 논문에서는 전치왜곡기를 이용하여 Mach-Zehnder 광변조기의 IMP3를 제거하여 1.9 GHz 대역에서의 광변조기의 선형성을 증가시키고 이를 통해 동적 동작 범위를 개선하였다.

## II. Mach-Zehnder 광변조기의 비선형 특성 분석

Mach-Zehnder 광변조기의 비선형 특성을 분석하기 위해서 서로 다른 두 주파수를 가진 입력 신호의 혼변조 왜곡을 이용하는 것이 일반적이다. Mach-Zehnder 광변조기의 RF신호와 광출력 사이의 변조 특성은 다음과 같이 표현된다.[5]

$$P_{out} = \frac{P_{in}}{2} \left( 1 - \cos\left(\frac{\pi V}{V_{\pi}} + \phi\right) \right) \quad (1)$$

식 (1)에서  $P_{out}$ 은 출력 광전력,  $P_{in}$ 은 입력 광전력,  $V_{\pi}$ 는 출력 광전력의 최대와 최소값 사이의 전압차,  $\phi$ 는 도파로 간의 고유 위상차를 나타낸다.

두 주파수  $\omega_1$ 과  $\omega_2$ 를 갖는 아날로그 RF 입력 신호를 식 (2)이라면

$$V(t) = A(\sin \omega_1 t + \sin \omega_2 t) \quad (2)$$

입력 신호  $V(t)$ 에 의해 Mach-Zehnder 광변조기를 외부 변조했을 때 바이어스를 quadrature 점에 잡았을 경우 출력되는 광신호  $P(t)$ 는 식 (3)와 같다.

$$P(t) = \frac{P_{in}}{2} \left[ 1 - \cos\left(\frac{\pi A}{V_{\pi}} (\sin \omega_1 t + \sin \omega_2 t)\right) \right] \quad (3)$$

식 (3)을 Bessel 함수를 이용하여 전개하면 DC, 주신호, 3차 혼변조 출력 성분은 다음과 같다.

$$P_{dc} = \frac{P_{in}}{2} \quad (4)$$

$$P_{\omega_1} = P_{\omega_2} = P_{in} J_1\left(\frac{\pi A}{V_{\pi}}\right) J_0\left(\frac{\pi A}{V_{\pi}}\right) \quad (5)$$

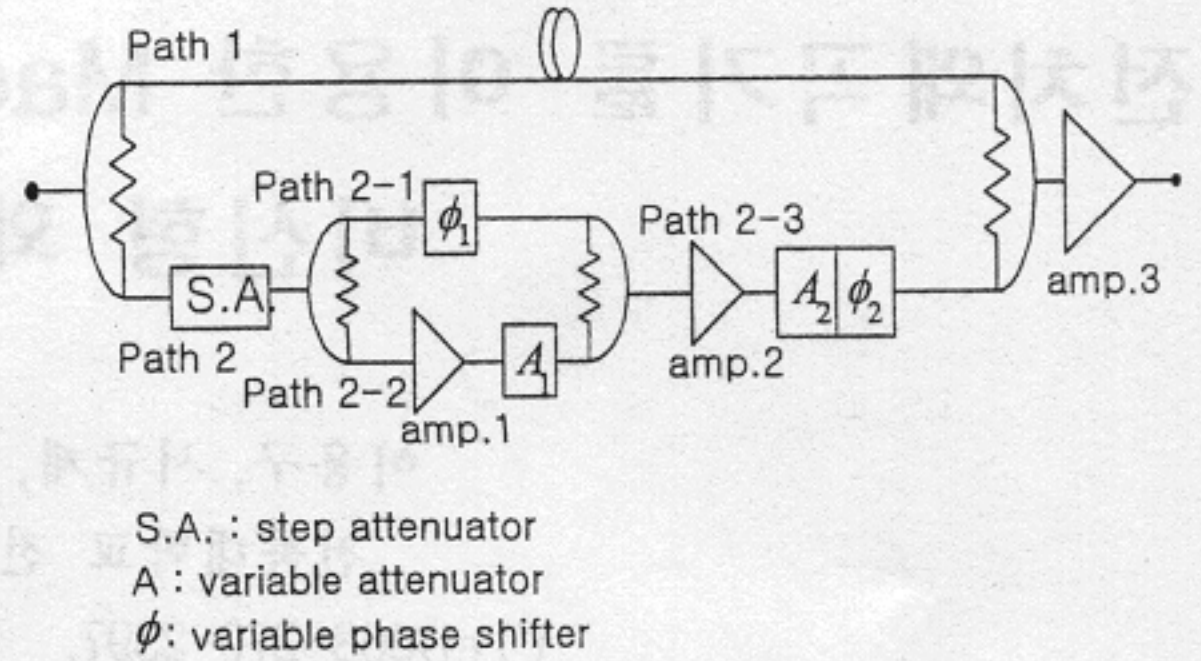


그림 1 전치왜곡기의 블록도

$$P_{2\omega_2 \pm \omega_1} = P_{in} J_2\left(\frac{\pi A}{V_{\pi}}\right) J_1\left(\frac{\pi A}{V_{\pi}}\right) \quad (6)$$

식(6)의 IMP3는 신호 전송시 시스템 성능을 저하시키고 특히 다중신호 전송시 신호들간의 혼변조 신호 수의 증가로 신호대 잡음비를 저하시킨다. 본 논문에서는 다중신호 전송시 발생하는 3차 혼변조 신호를 전치왜곡기를 이용하여 선형화하였다.[6]

## III. 전치왜곡기의 제작

Mach-Zehnder 광변조기의 비선형 왜곡을 보상하기 위해 전치왜곡기를 제작하였다. Mach-Zehnder 광변조기의 비선형성을 측정해 본 결과 IMP3 발생 후 입력신호가 12dB 정도 증가한 후 IMP5가 발생함을 알 수 있었고 이를 바탕으로 IMP3만이 발생하는 영역에서 IMP3를 제거하여 Mach-Zehnder 광변조기의 선형성을 증가시켰다.

그림 1은 제작된 전치왜곡기의 블록도이다. 전치왜곡기의 동작원리를 살펴보면 RF 입력 2-tone 신호는 RF 3dB 전력 분배기를 통해 경로 1과 경로 2로 신호가 나뉜다. 경로 1은 주신호가 진행하는 경로이며, 경로 2로 진행된 신호는 IMP3를 발생시킨다.

경로 2로 진행된 신호 전력은 S.A.(step attenuator)를 사용하여 입력되는 신호 전력이 -6~-6dBm 일 때 출력신호의 전력은 -8dBm으로 고정된다. 이 신호는 RF 3dB 전력 분배기를 통해 경로 2-1과 경로 2-2로 진행된다. 경로 2-2는 증폭기 1의 비선형 특성에 의해 IMP3를 발생시킨다. 경로 2-2에서 발생한 신호와 경로 2-1에서의 신호의 위상이 반대가 되도록 가변 위상 조절기  $\Psi_1$ 과 가변 감쇄기  $A_1$ 을 조절해 RF 3dB 전력 결합기를 통하여 IMP3만을 만들어 경로 2-3으로 진행한다. 이 신호는 증폭기 2에서 증폭되어 경로 1로 진행한 주 신호와 더해지는데 주 신호와 IMP3는 위상이 180°가 되도록 가변 위상조절기  $\Psi_2$ 와  $A_2$ 에 의해 제어된다.

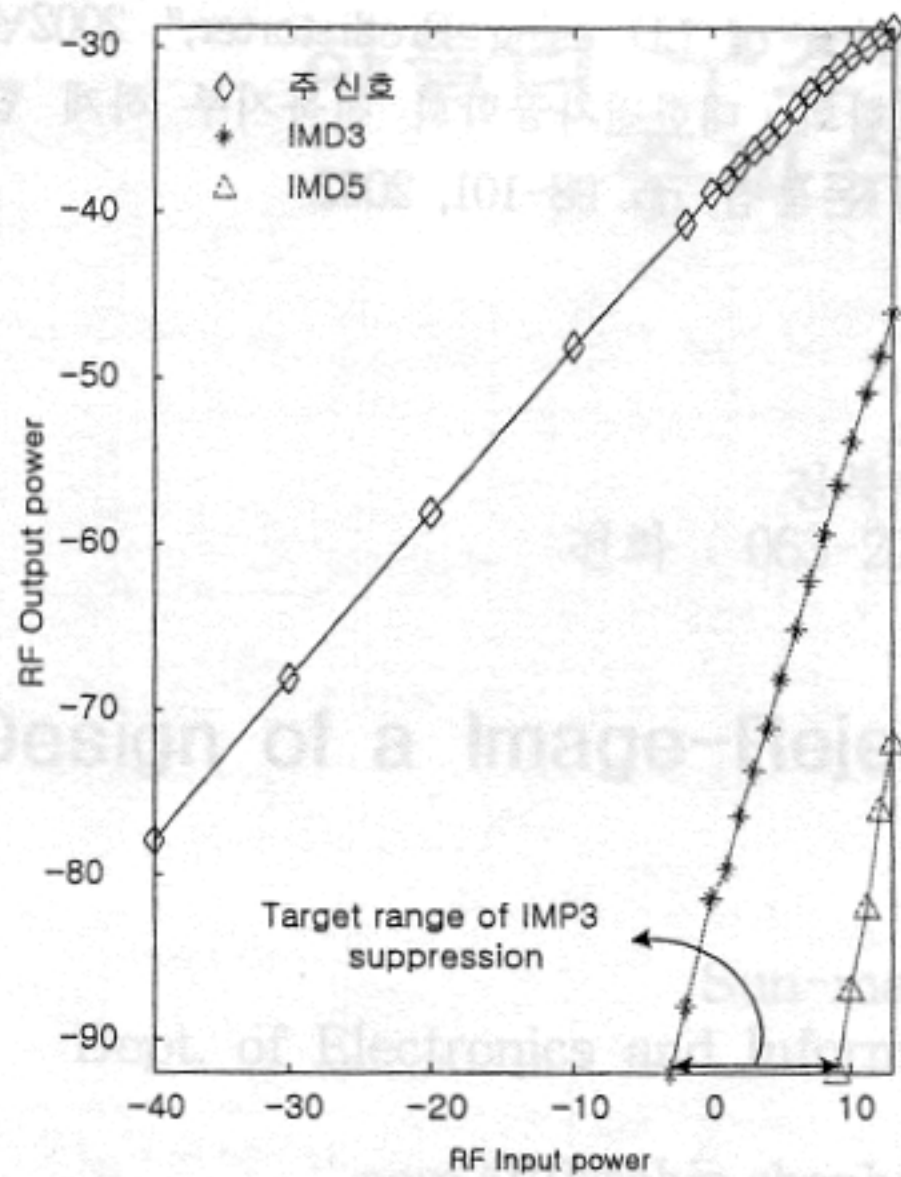


그림 2 Mach-Zehnder 광변조기의 비선형성 측정 결과

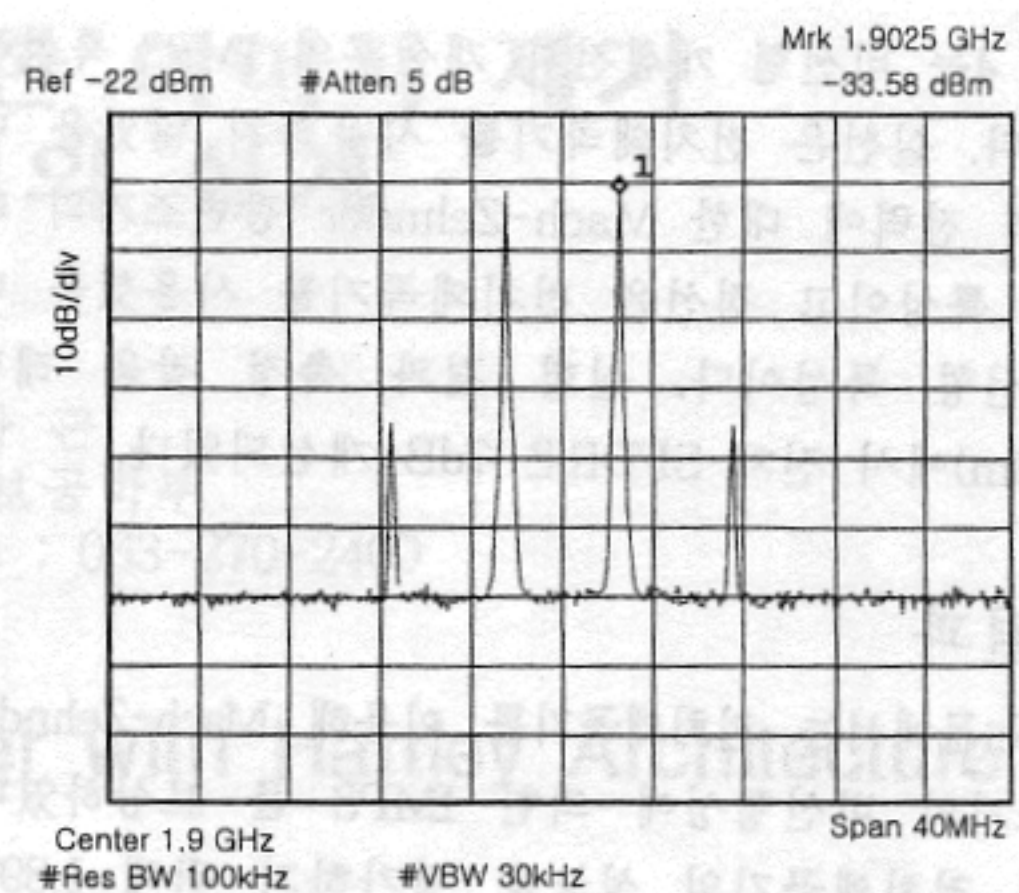
RF 전력 결합기에 의해 결합된 주 신호와 IMP3 신호는 증폭기 3을 통해 다시 증폭되어 Mach-Zehnder 광변조기의 RF 입력단에 입력된다.

#### IV. 실험 결과 및 고찰

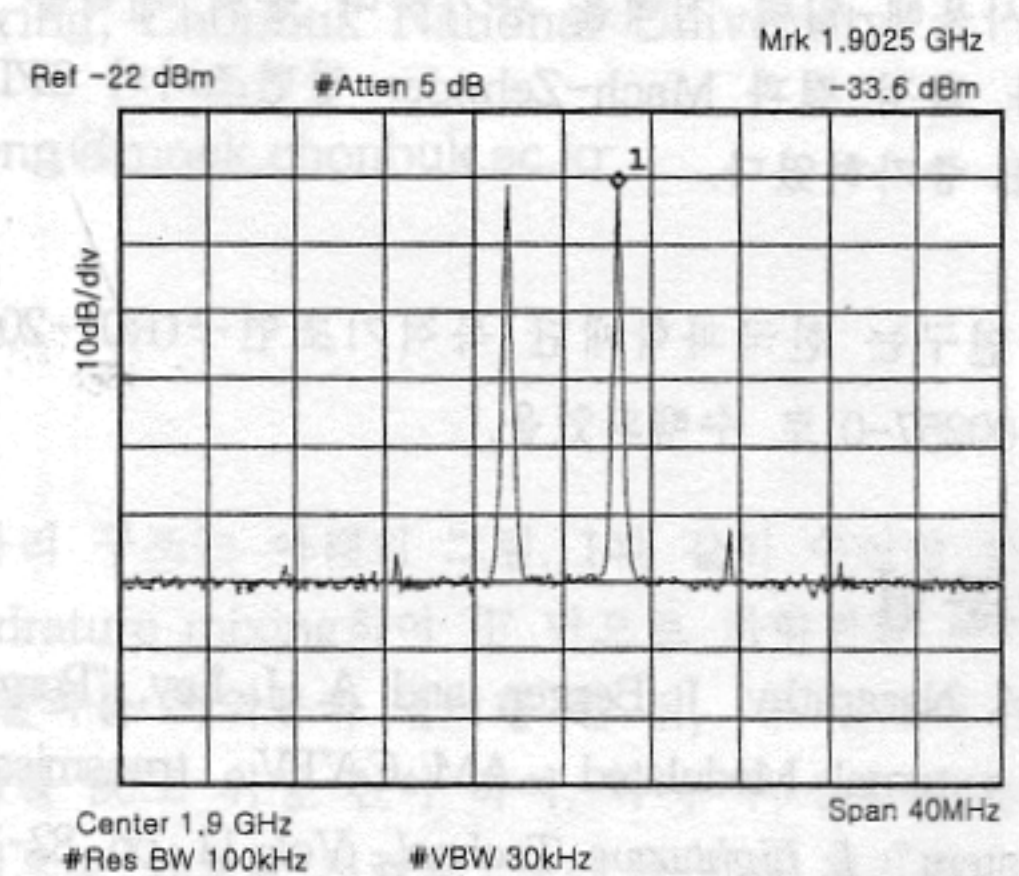
Mach-Zehnder 광변조기의 비선형성을 측정하기 위해 두 개의 주파수를 가진 RF 2-tone을 사용해 Mach-Zehnder 광변조기를 변조하고 변조된 광신호를 광 검출기로 광/전 변환시켜 이 때 측정되는 주 신호와 IMP3의 전력을 측정하였다. 실험은 1550nm 파장의 광출력 전력이 8dBm인 광원과 RF 2-tone 신호의 주파수는 1.8975 GHz와 1.9025 GHz를 사용하였다. RF 입력 신호의 크기를 -40~13dBm까지 변화시키면서 RF 출력 신호의 전력을 측정하였다.

그림 2는 Mach-Zehnder 광변조기의 비선형성 측정 결과를 보여주고 있다. ◇은 주 신호의 전력, \*은 IMP3의 전력, △은 IMP5의 전력이다. 측정결과 RF 입력 전력이 -3dBm 이상에서 IMP3가 발생하고 그 이상의 전력이 입력되면 주 신호보다 큰 기울기로 IMP들이 증가한다. IMP3가 발생한후 IMP5가 발생할 때까지의 입력전력 차이가 12dB이고 본 논문에서는 이 범위내의 IMP3를 제거하는 전치왜곡기를 제작하였다.

그림 3은 출력 전력이 -33.6dBm 일 때 전치왜곡기를 사용하지 않았을 때와 전치왜곡기를 사용했을 때의 스펙트럼 특성을 보여주고 있다. 그림 3(a)와 비교하여 그림 3(b)의 IMP3의 크기가 -67dBm에서 -86dBm으로 감소하여 19dB가 개선되었다.



(a) 개선 전



(b) 개선 후

그림 3 비선형성 개선전과 개선후의 스펙트럼 특성(@P<sub>o</sub>= -33.7dBm)

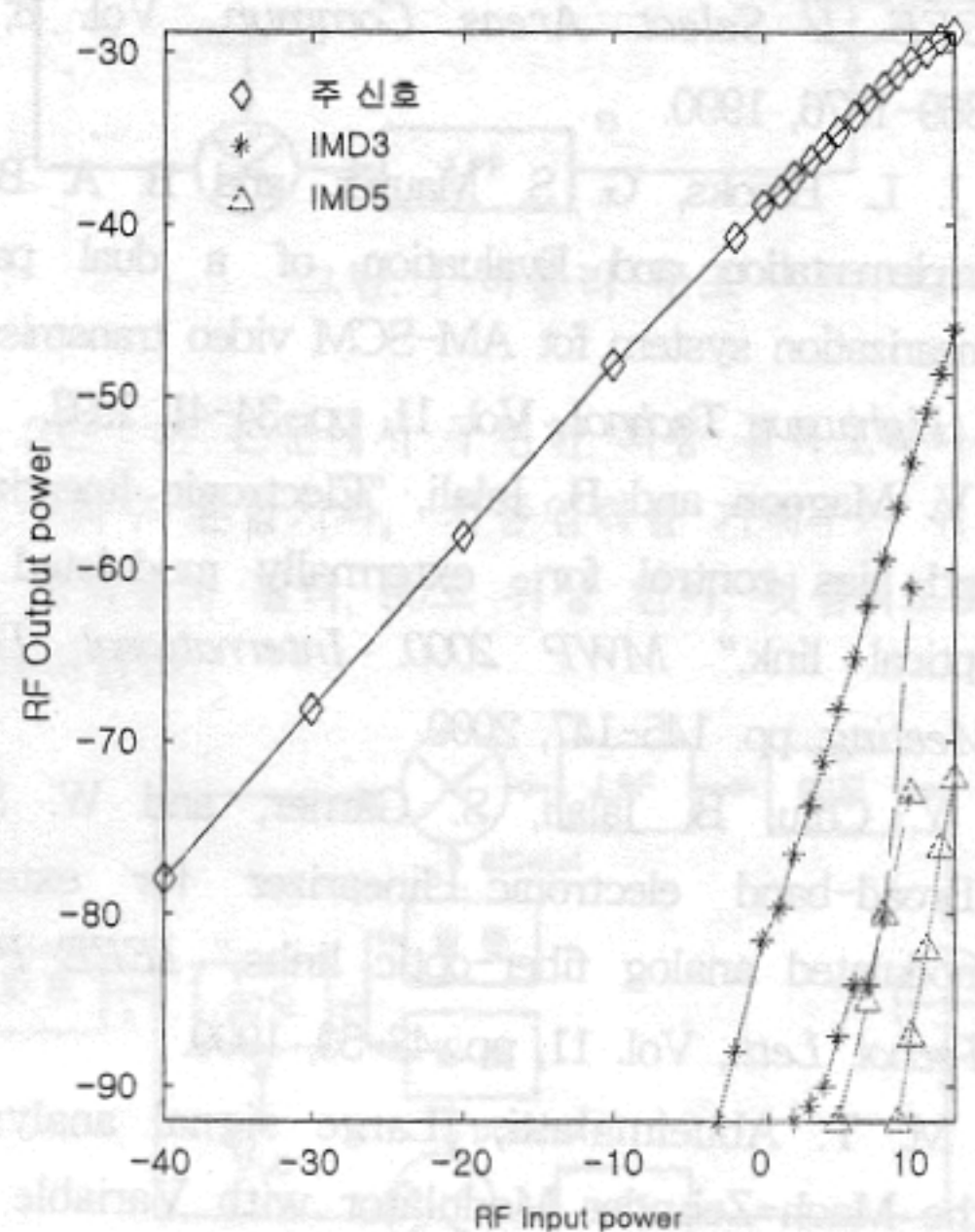


그림 4 비선형 개선전과 개선후의 IMP3 특성

그림 4는 비선형 개선전과 개선후의 IMP3 특성을 나타낸다. 실선은 전치왜곡기를 사용하지 않았을 때의 입력 전력에 대한 Mach-Zehnder 광변조기의 비선형성 특성이고 점선은 전치왜곡기를 사용했을 때의 비선형 특성이다. 실험 결과 측정 잡음 레벨(-92dBm)에서 전체 SFDR은 7dB 개선되었다.

## V. 결과

본 논문에서는 전치왜곡기를 이용해 Mach-Zehnder 광변조기의 비선형성에 의한 IMP3 를 보상하였다. 제작된 전치왜곡기의 성능을 평가하기 위해 1.8975 GHz와 1.9025 GHz의 주파수를 갖는 RF 2-tone 신호를 사용해 입력 전력을 증가하며 출력 전력을 측정했다. 측정 결과 Mach-Zehnder 광변조기의 SFDR이 7dB 증가하였다.

\* 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2000-000-00257-0)로 수행되었음.

## 참고문헌

- [1] M. Nazarathy, J. Berger, and A. J. Ley, "Progress in external Modulated AM CATV transmission system," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 11, pp. 82-105, 1993.
- [2] R. B. Childs and V. A. O'byrne, "Multichannel AM video transmission using a High power Nd:YAG laser and linearized external modulator," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, Vol. 8, pp. 1369-1376, 1990.
- [3] J. L. Brooks, G. S. Maurer, and R. A. Becker, "Implementation and Evaluation of a dual parallel linearization system for AM-SCM video transmission," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 11, pp. 34-41, 1993.
- [4] V. Magoon and B. Jalali, "Electronic linearization and bias control for externally modulated fiber optical link," *MWP 2000. International Topical Meeting*, pp. 145-147, 2000.
- [5] Y. Chiu, B. Jalali, S. Garner, and W. Steier, "Broad-band electronic linearizer for externally modulated analog fiber-optic links," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 11, pp. 48-50, 1999.
- [6] M. T. Abuelma'atti, "Large signal analysis of the Mach-Zehnder Modulator with Variable bias," *Proc. Natl. Sci.*, Vol. 25, No. 4, pp. 254-258, 2001.
- [7] 서규재, 임현민, 정용채, 반재경, "Nonlinear Distortion

Compensation of LD using Predistorter," 2002년도 한국통신학회·대한전자공학회 전북지부 하계 합동 학술대회 논문집, pp. 98-101, 2002.

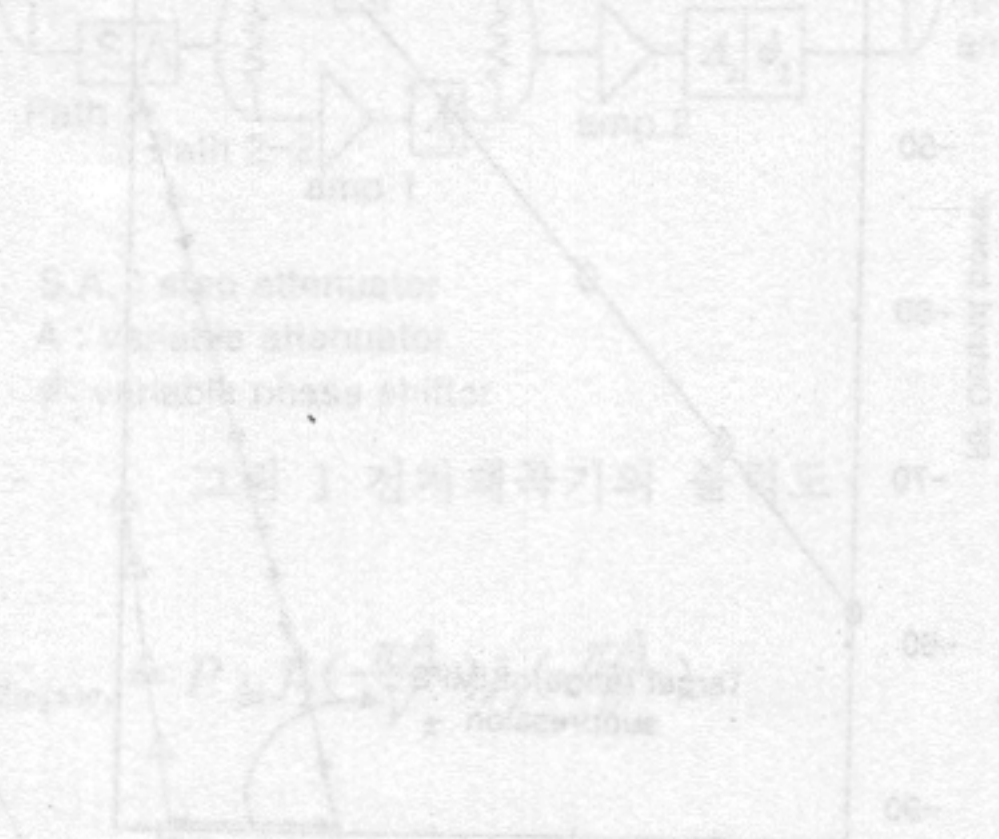


Figure 4 is a graph showing the relationship between input power and output power for a Mach-Zehnder modulator. The x-axis is labeled 'Input Power (dBm)' and the y-axis is labeled 'Output Power (dBm)'. Two curves are shown: a solid line representing the non-linear characteristic without pre-distortion, and a dashed line representing the characteristic with pre-distortion. The dashed line shows a significantly higher dynamic range, indicating improved SFDR.