

논문 2008-45SD-5-5

WDM/SCM RoF 시스템에서 광 주입 기술을 적용한 피드포워드 아날로그 광송신기의 파장차이에 따른 상호변조 왜곡성분의 특성 분석

(Analysis of Intermodulation Distortion for Wavelength-Dependence
Transmission Experiment of a Feedforward Analog Optical Transmitter
with External Light Injection Method in WDM/SCM RoF Systems)

문 연 태*, 최 영 완**

(Yon-Tae Moon and Young-Wan Choi)

요 약

레이저 다이오드의 비선형성으로 인해 발생하는 왜곡성분들을 제거하기 위해 피드포워드 선형화 기법을 적용한 광송신기를 제작하였다. 레이저 다이오드의 파장차이에 따른 광전송 실험을 위해 광 주입 기술을 피드포워드 기법에 적용하여 3차 상호변조 왜곡성분(IMD3)의 크기변화를 측정하였다. 광 전송길이 및 레이저 다이오드의 파장차이로 인해 생기는 위상 부정합 현상을 분석하고 이에 따른 IMD3의 크기변화를 시뮬레이션 및 측정 하였다. 그리고 IMD3의 억제량의 변화를 극복하기 위해 정량적인 위상 가변량을 계산하였으며, 시스템 설계시 고려해야 할 가이드라인을 제시한다.

Abstract

We have experimentally demonstrated the transmission performance of a feedforward optical transmitter using an external light injection technique. The feedforward compensation method shows 31 dB intermodulation distortion suppression and 2.2 dB noise reduction. A high side-mode suppression ratio exceeding 35 dB of the wavelength of the locked Fabry-Perot laser diode was obtained over 12 nm ranges. The suppression characteristics of the intermodulation distortion for various wavelength differences and transmission lengths were measured and analyzed as the evaluation criteria for the system performance in WDM/SCM based radio-over-fiber systems.

Keywords : 피드포워드 보상기법, 아날로그 광송신기, 3차 상호변조 왜곡성분, 광 주입 기법

I. 서 론

최근 들어 정보통신 서비스에 대한 고객의 요구는 날이 증가하고 있으며, 보다 나은 Quality of Service (QoS)들을 건물들 사이의 음영 지역이나 지하 같은 전파 고립지역에서부터 전파환경이 우수한 아파트나 인구

밀집지역까지 원하고 있다. 이러한 상황에서 유·무선 통합형 통신 시스템인 Radio-over-Fiber (RoF) 시스템은 새로운 방안으로 대두되고 있다. RoF 시스템은 손실이 적고 간섭이 없는 광통신 시스템과 이동성의 장점을 가진 무선 통신기술을 결합한 통신방식으로 기지국과 원격 안테나 사이를 광섬유를 이용하여 변조된 마이크로파 대역의 신호를 전송하고 원격 안테나에서는 광섬유를 통해 전송된 신호를 무선으로 전달한다^[1~2]. 동축 케이블을 사용하는 기존의 통신 방식과는 달리 RoF 시스템은 광섬유를 이용하기 때문에 기지국과 원격 안테나 간 전송 시 RF신호를 낮은 주파수로 변환할 필요 없

* 학생회원, ** 정회원, 중앙대학교 전자전기공학부
(School of Electrical and Electronic Engineering,
Chung-Ang University)

※ 본 논문은 2008년도 중앙대학교 우수연구자 연구비
와 서울시 SUITE 지원에 의한 것임.

접수일자: 2008년2월1일, 수정완료일: 2008년4월1일

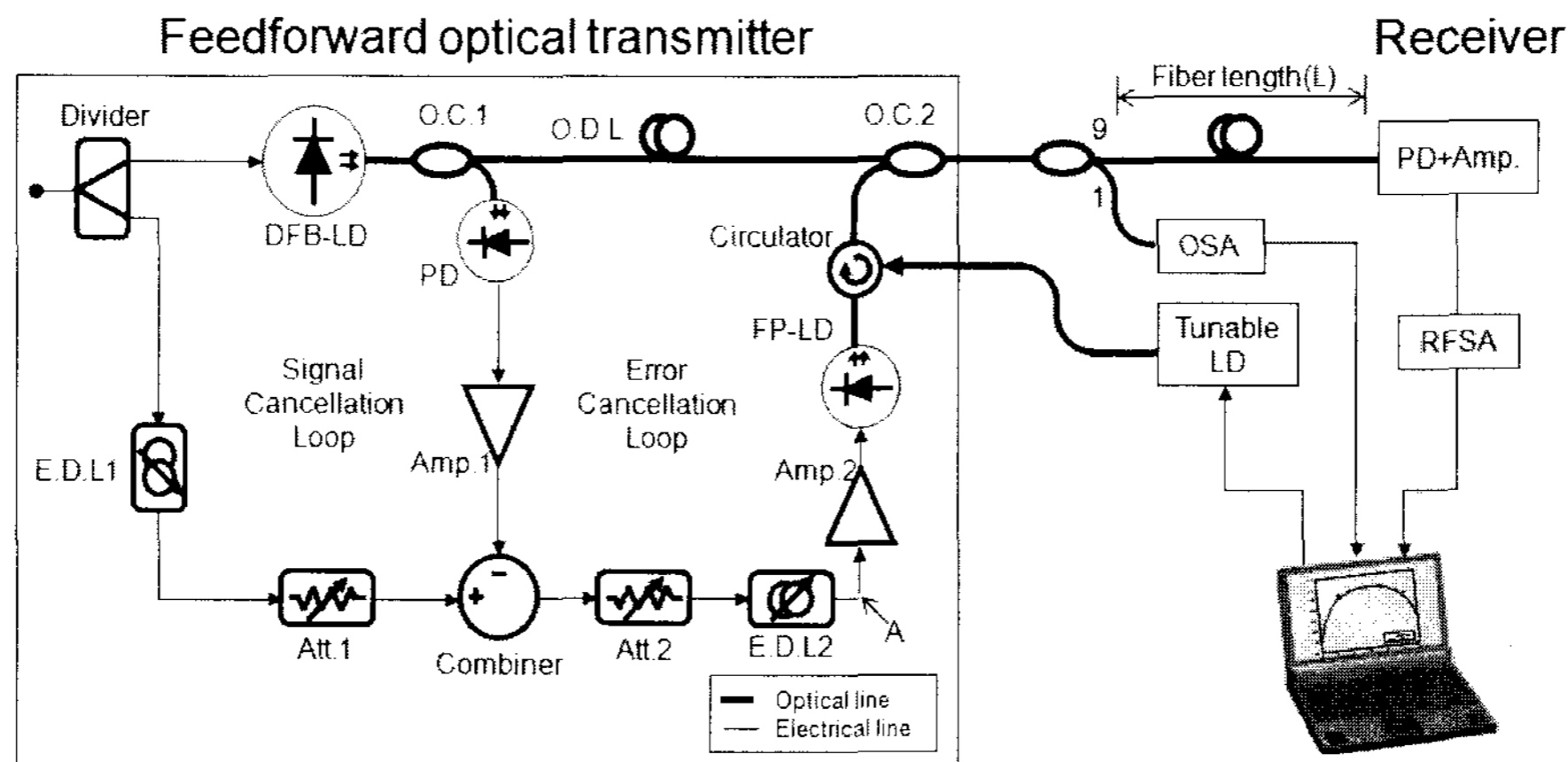


그림 1. 광 주입 기법을 이용한 피드포워드 아날로그 광송신기와 광 전송 실험을 위한 측정도

Fig. 1. Block diagram of feedforward optical transmitter using light injection technique and transmission experiment setup.

이 마이크로파 대역의 신호로 직접 보낼 수 있게 된다. 그러므로 기존처럼 원격 안테나에 주파수 변환을 위한 회로가 추가되지 않기 때문에 원격 안테나의 구성이 간단해지고 이는 전체 시스템의 구축비용, 관리 등의 면에서 장점을 가진다. 현재의 무선통신 시스템에서 사용하는 가장 일반적인 광 전송시스템은 다수의 RF신호를 레이저 다이오드(LD)에 동시에 직접 변조하는 아날로그 Sub-carrier multiplexing(SCM) 광 전송방식이다. 하지만 이러한 아날로그 SCM 광 전송방식은 LD의 비선형성 때문에 시스템의 성능을 열화 시킨다. 이런 비선형 왜곡현상을 줄이기 위한 방법으로 전치왜곡(pre-distortion)^[3], 백오프(back-off), 그리고 피드포워드(feedforward) 같은 다양한 방식들이 사용되었다. 이들 방식 중에서 피드포워드 보상기법은 피드백(feedback) 경로가 없기 때문에 더 좋은 선형성과 더 안정된 광대역 동작특성을 보이며, 외부 환경에도 강한 특성을 보인다^[4~8]. 기존에 발표된 피드포워드 광송신기는 1300 nm의 LD를 이용하여 광섬유의 분산에 의한 영향을 받지 않았지만 현재 장거리 통신용으로 많이 사용되고 있는 1550 nm의 파장을 가진 LD를 사용하여 송신기를 제작하게 되면 광섬유의 분산 효과에 의해 전송 거리의 제한을 받게 된다. 그러나 기존의 1550 nm 파장을 가진 광송신기의 광섬유 분산에 의한 전송 특성에 관한 연구는 짧은 거리에 대해 소개된 바가 있으나^[8], 일반적인 광전송 시스템에서의 기지국과 광 중계기의 거리가 20 km 정도임을 감안 할 때 충분하지 못하다. 따라서 아날로그 광송신기가 실제 RoF 시스템에서 적용되기 위해서는 충분한 거리에서 비선형 성분의 특성을 파악하고

개선해야 한다. 그리고 피드포워드 광송신기를 Coarse wavelength division multiplexing (CWDM)/SCM RoF 시스템에 적용하기 위해서는 광 필터 특성 때문에 광송신기의 파장간격을 고려해야 하고, 파장차이에 따른 광섬유 분산의 영향에 관한 연구가 추가로 요구된다.

본 논문에서는 레이저 다이오드의 선형성을 향상시키기 위해 높은 선형성을 가지는 피드포워드 선형화 보상기법을 적용한 광송신기를 제작한다. 또한 파장차이에 따른 광섬유 분산 영향을 고려하기 위해 광 주입기술을 이용하여 전송길이에 따라 비선형 왜곡 성분의 크기변화를 시뮬레이션과 실험으로 얻는다. 광섬유 분산의 영향으로 발생하는 위상 부정합을 파장차이와 전송길이에 따라 분석하고 시스템 설계 방향을 제시한다.

II. 본 론

1. 광주입 기술을 적용한 피드포워드 보상기법

그림 1은 제안된 피드포워드 광송신기 및 광 전송 실험을 위한 측정 셋업이다. 피드포워드 선형화 보상기법은 입력된 RF 신호가 LD에서 직접 변조 시 전기신호가 광신호로 바뀌는 과정에서 추가적으로 발생하는 비선형 왜곡성분만을 추출하여 전기적 신호로 변환한 후 적절한 위상 천이와 증폭을 통하여, LD 원래의 출력신호와 수신단에서 광전 변환하여 결합시켜 LD로부터 발생한 비선형 왜곡성분만을 감소 혹은 상쇄하는 방법이다. 이러한 방법은 광송신기로부터 발생한 비선형 왜곡성분을 직접 결합하여 위상천이 및 시간의 지연을 이용하여 상쇄하는 방식이기 때문에 사용되는 LD의 고유의 특성

과 종류에 관계없이 효과적으로 비선형 왜곡성분만을 상쇄시킬 수 있다. 피드포워드 선형화 보상기법을 적용한 광송신기는 그림 1에서와 같이 두 가지의 상쇄루프를 가지고 있다. 첫째로, 임의의 크기를 가진 RF 입력신호가 임의의 인가전류 조건에 의하여 주 LD(primary laser diode)에서 출력된 비선형 왜곡성분을 포함한 광신호를 광 커플링한 후 전기적 신호(여기서는 RF신호)로 변환한 주 신호와 주 발광부에 입력되기 전의 RF 신호와 벡터적으로 결합함으로써 주 발광부로 인하여 발생한 성분들 중 비선형 왜곡성분만을 추출하는 1차 루프 즉, 신호 상쇄루프(signal cancellation loop)이다. 둘째로, 신호 상쇄루프를 거친 비선형 왜곡성분만을 보조 LD(secondary laser diode)를 이용하여 광 변환한 신호와 주 발광부에서 출력된 비선형 왜곡성분을 포함한 광신호를 광 커플링을 통하여 결합하여 송신하는 2차 루프, 즉 에러 상쇄루프(error cancellation loop)로 구성된다. 제작된 아날로그 피드포워드 광송신기에 사용된 Distributed feedback laser diode (DFB-LD)의 파장은 1551.83 nm이고, Fabry-Perot (FP-LD)의 중앙 파장은 1553.25 nm이다. 그림 1의 EDL은 전기적 지연선로, Att는 감쇄기, Amp는 증폭기, OC는 광결합기, ODL은 광지연선로를 나타낸다.

광송신기와 광수신기를 연결하는 광섬유는 광섬유 분산 D는 17 ps/km·nm(@ 1550 nm)이고, 감쇄상수가 0.197 dB/km(@ 1550 nm)인 단일모드 광섬유(SMF: Single-Mode Fiber)이다. 전송길이에 따른 3차 상호변조 왜곡성분(IMD3)의 크기 변화를 측정하고자 1 km 부터 21 km까지 측정 가능한 광섬유를 준비하였다. 실험

결과의 정확성을 위해 측정장비와 컴퓨터 간 GPIB를 통해 MATLAB 프로그램을 이용하여 실험결과를 추출하였다. 그림 2는 피드포워드 선형화 보상기법을 적용했을 때와 보상기법을 적용하지 않았을 때의 광송신기의 출력신호를 측정한 결과이다. Back-to-back(B2B) 측정시 선형화 보상기법을 적용하지 않았을 때 IMD3가 -21 dBc이고 선형화 보상기법을 적용했을 때 IMD3가 -52 dBc로서 주 LD의 IMD3가 31 dB 개선되었다. 또한 상대강도잡음(RIN)이 2.2 dB 개선된 결과를 얻었다. 이때 광송신기의 출력으로 나오는 주 LD의 광 전력은 -10.26 dBm이고, 두 번째 LD의 광 전력은 -8.82 dBm이다. RF 입력신호는 각 톤당 -5 dBm이고 중심주파수 2.3305 GHz 에서 주파수 간격이 1 MHz인 투톤 신호이다.

2. 위상 부정합에 따른 억제량의 해석적 분석

주파수 ω 인 광신호가 길이 L인 Single mode fiber (SMF)를 통과하는데 걸리는 시간 $t = L/v_g$ 이다.

v_g 는 그룹속도를 나타내는데, $v_g = d\omega/d\beta$ 와 같이 정의된다. 전파상수 $\beta = \bar{n}k_0 = \bar{n}\omega/c$ 와 같이 정의되는데, 이를 이용하면 $v_g = c/\bar{n}_g$ 와 같이 나타낼 수 있다. \bar{n} 과 \bar{n}_g 는 각각 모드지수(mode index)와 그룹지수를 나타낸다. 그룹지수 $\bar{n}_g = \bar{n} + \omega(d\bar{n}/d\omega)$ 와 같이 나타낸다. 그룹속도 v_g 의 주파수 의존성으로 인해 다른 파장을 가진 광 신호들이 광섬유 끝단에서 서로 다른 시간을 가지고 도착하게 된다.

$$D = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{L}{v_g} \right) = - \frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta^2 \quad (1)$$

일 때, 그룹 지연시간차는 다음과 같다.

$$\Delta\tau (= \tau_1 - \tau_2) = (L/v_{g1} - L/v_{g2}) = DL\Delta\lambda \quad (2)$$

D는 분산 계수이고 단위는 ps/km·nm 이고, $\Delta\lambda$ 는 광송신기에 사용하는 LD들의 파장간격을 나타낸다.

식 (2)으로부터 길이 L인 SMF를 지난 후의 위상 부정합 Φ_L 은 다음과 같이 구해진다.

$$\Phi_L = 2\pi f \Delta\tau = 2\pi f DL\Delta\lambda \quad (3)$$

주파수 ω 인 광신호가 길이 L인 SMF를 통과한 후의 신호의 감쇄량은 감쇄 상수(attenuation coefficient) α (dB/km)를 이용하여 αL 과 같이 나타낼 수 있다. 감쇄 상수 역시 주파수에 의존적이지만 1550 nm 단일모드

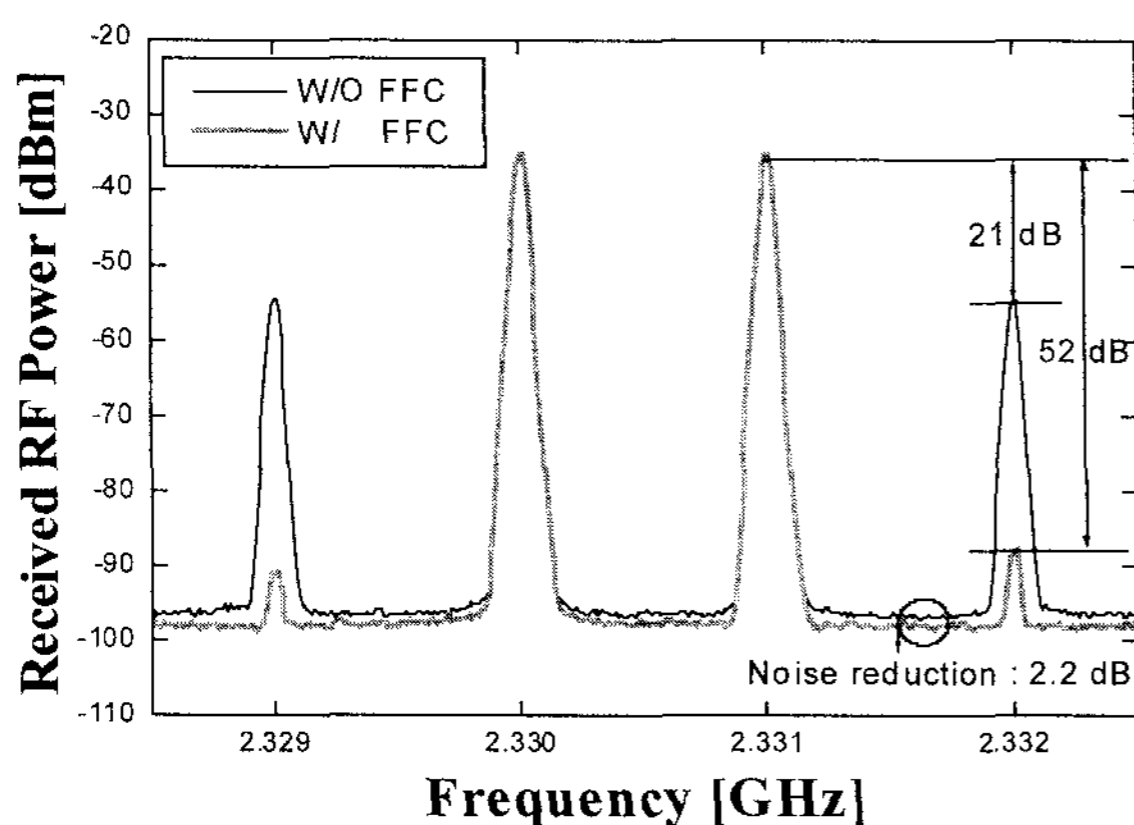


그림 2. 피드포워드 선형화 기법을 적용했을 때와 적용하지 않았을 때 광송신기의 출력신호

Fig. 2. Output signals of optical transmitter with linearization and without linearization.

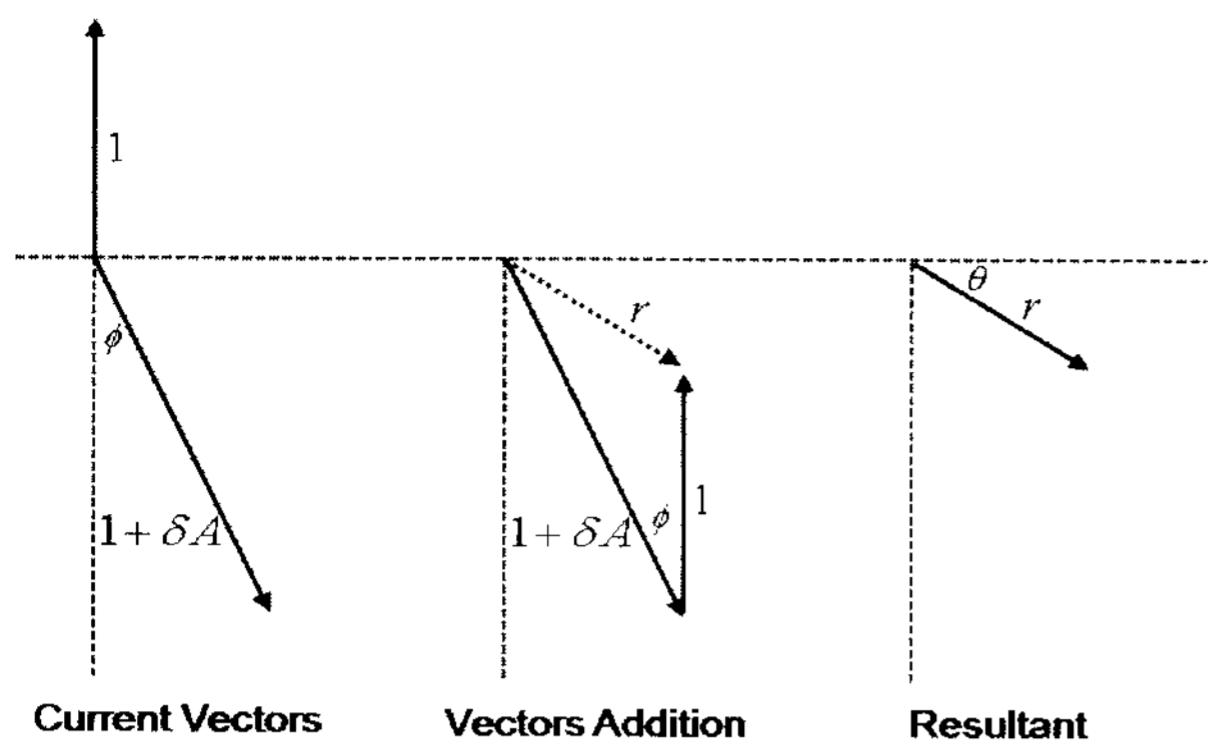


그림 3. 위상 부정합과 억제량의 벡터관계
Fig. 3. Geometrical figure for vector control theory.

광섬유에서 1550 nm 근처의 수 nm 이하 파장차이의 광 신호가 가지는 감쇠상수 α 는 동일하다고 생각해도 된다. 따라서 두 신호의 파장차이에 따른 감쇠량이 동일하고 위상 부정합 ϕ_L 만이 억제량에 영향을 미친다고 가정하면 억제량은 그림 3과 같이 벡터의 차로 나타낼 수 있다.

그림 3은 두신호의 벡터 합을 보여준다. 크기 1과 위상 0° 를 가진 기준신호와 크기 $1 + \delta A$ 와 위상 $180^\circ + \phi$ 를 가진 비이상적인 상쇄 신호를 코사인법칙을 이용하여, 상쇄신호와 같은 주파수를 가진 합성벡터 r 의 크기는 식 (4)와 같이 계산된다. 식 (4)의 양변에 \log 를 취하여 정리하고, 메인신호와 IMD3의 차이인 S_0 를 삽입하여 정리하면 3차 상호변조 왜곡성분의 크기인 $S[\text{dBc}]$ 를 식 (5)로 나타낼 수 있다. 여기서 ΔA 는 신호의 크기 변화량이고, $\Delta \phi$ 는 위상 변화량이다.

$$r^2 = (1 + \delta A)^2 + 1 - 2(1 + \delta A) \cdot \cos(\phi) \quad (4)$$

$$S = S_0 + 10 \log \left(1 + 10^{\frac{\Delta A}{10}} - 2 \cdot 10^{\frac{\Delta A}{20}} \cos(\phi_L + \Delta \phi) \right) \quad (5)$$

식 (5)를 이용하여 광섬유 길이와 파장차이를 고려하여 IMD3의 크기를 계산해보면, 그림 4와 같은 모의 실험결과를 얻는다. 전송길이와 파장차이가 변화함에 따라 IMD3 성분의 억제량이 달라짐을 알 수 있는데, 이와 같은 현상을 실험적으로 증명하기 위하여 광 주입 기술을 이용하여 파장차이를 가변시켰고, 광섬유 길이를 조절하여 IMD3[dBc]의 특성을 확인하였다.

3. 광 주입 기법

그림 1에서 피드포워드 보상기법에 사용하는 LD2는 에러신호를 전/광 변환하는 역할을 한다. 파장차이에 따

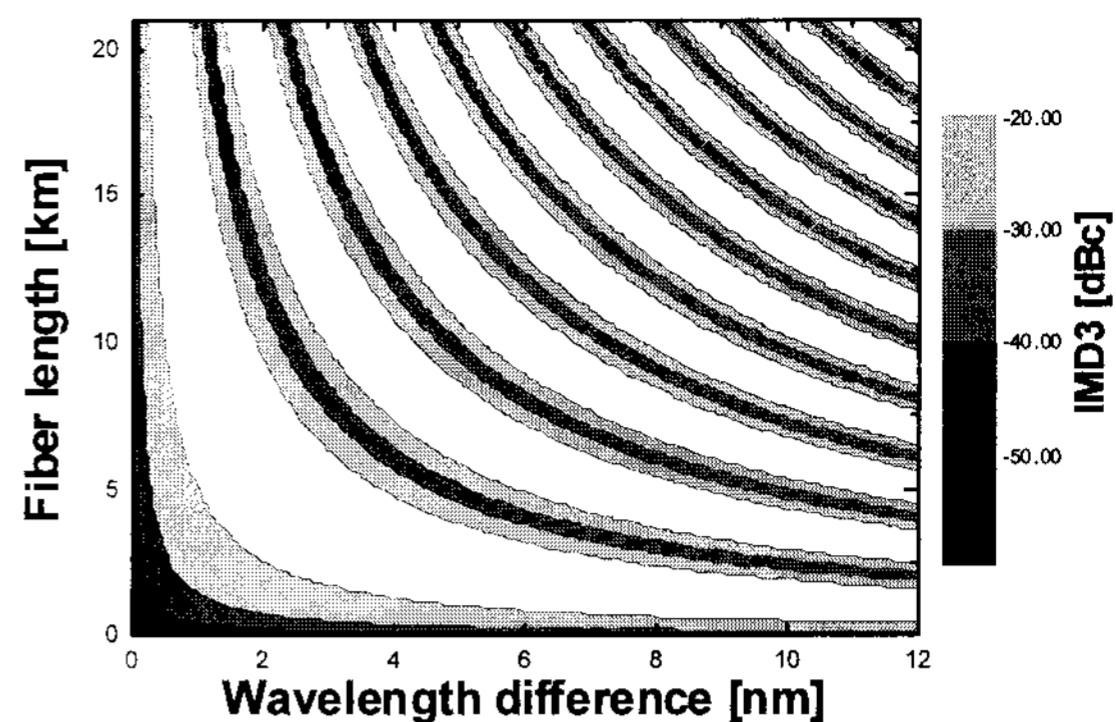


그림 4. 전송길이와 파장차이에 대한 시뮬레이션 결과
Fig. 4. Simulation results for various transmission lengths and wavelength differences.

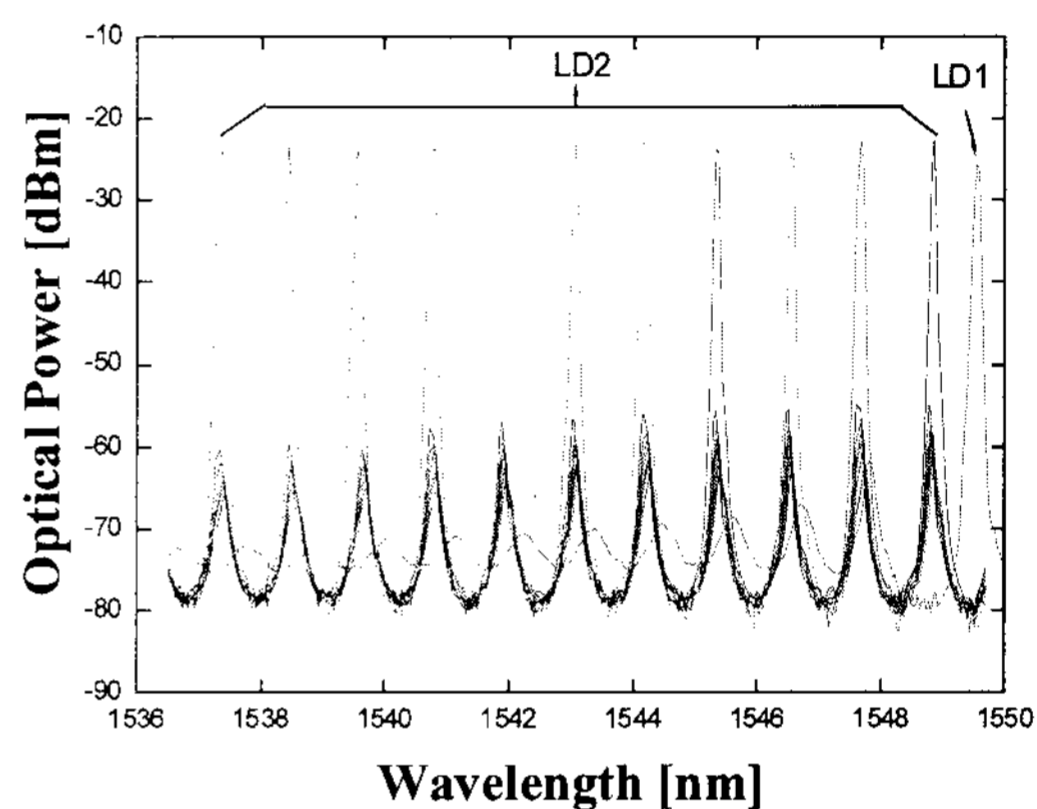


그림 5. DFB-LD(LD1)의 출력 파장과 광 주입한 FP-LD(LD2)의 출력파장
Fig. 5. Output wavelengths of DFB-LD and mode locking FP-LD.

른 광 전송실험을 하기 위해 unisolated 된 FP-LD에 광 서클레이터와 파장가변 레이저를 이용하여 광을 주입시켜 FP-LD의 출력 파장을 locking시켰다.

따라서 FP-LD의 광 주입 모드들은 외부 파장가변 레이저를 통해 선택적으로 결정할 수 있다. 그림 5는 DFB-LD의 출력 파장과 FP-LD의 광 주입 모드들을 나타낸다. 이때 FP-LD의 동작전류는 15.05 mA이고, 입사된 광 전력은 -5.7 dBm 이다. 광 주입 기술을 통해 얻은 광 주입 모드들의 Side-mode suppression ratio (SMSR)는 35 dB 이상 확보되었으며, 파장차이는 0.48 nm 에서 11.96 nm까지 조절이 가능하였다.

III. 측정 결과

1. 전송거리에 따른 상호변조 왜곡성분

3차 상호변조 왜곡성분의 위상은 광섬유 분산으로 인

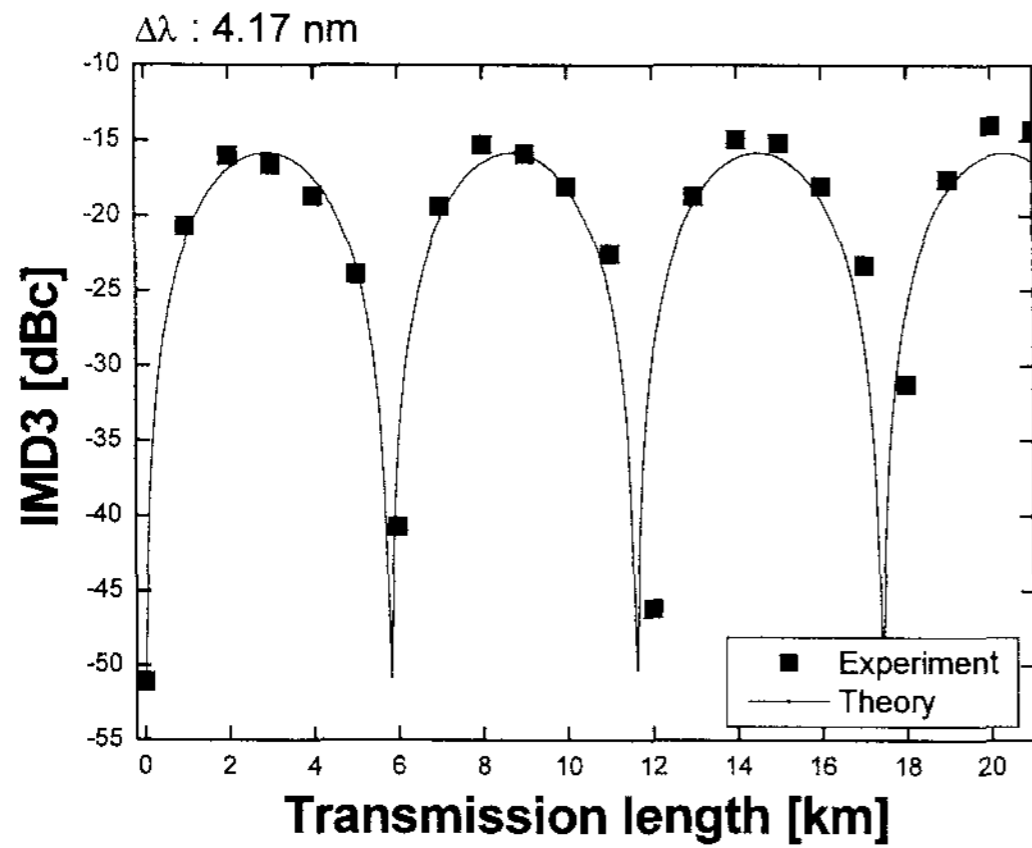


그림 6. 파장차이가 4.17 nm 일 때 전송길이에 따른 IMD3의 크기변화
 Fig. 6. IMD3 for transmission length at wavelength difference 4.17 nm.

해 전송거리 따라 변화하게 된다. 그림 6은 파장이 고정되었을 때 광섬유 전송길이에 따른 IMD3의 크기변화를 보여준다. 그림 6에서 파장차이가 4.17 nm 이고, 광섬유의 길이가 6 km 와 12 km 일때 정확히 IMD3가 각 -40 dBc와 -45 dBc 이상 측정됨을 보여준다. 또한 실험적으로 파장차이가 8.73 nm 일 때 길이가 증가함에 따라 신호의 위상이 부정합되는 영역이 두배 이상 증가함을 알 수 있다. 이는 파장차이가 증가함에 따라 신호의 속도차이에 따른 위상 부정합이 광섬유분산에 의해 발생했기 때문이다.

2. 파장 차이에 따른 상호변조 왜곡성분

아날로그 피드포워드 광송신기의 억제량이 변하는 이유는 두 신호를 전/광 변환하는 레이저 다이오드들이 동일한 파장을 가지기 힘들기 때문에 각각 다른 파장을 가지고 전송되는 광 신호들은 광섬유를 통해 전송되면서 다른 전송시간 및 신호 감쇠량을 가지게 되고, 이는 위상과 크기 부정합을 변화시켜서 3차 상호변조 왜곡성분의 억제량을 변하게 한다. 그림 7은 광섬유의 길이가 고정되었을 때 레이저 다이오드의 파장차이($\Delta\lambda$)에 따른 3차 상호변조 왜곡성분의 크기를 보여준다. 그림 7을 보면, 광섬유의 길이가 10 km 일 때 IMD3가 7.3 nm 부근에서 -50.6 dBc 로 측정되었다. 그리고 길이가 5 km 일때는 파장차이가 4.7 nm 와 9.6 nm인 지점에서 IMD3가 -50 dBc 로 시뮬레이션 결과로서 실험 결과를 예측할 수 있다. 전송길이가 증가함에 따라 신호의 위상이 부정합되는 영역이 두배 이상 증가함을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 전송길이와 파장차이에 따라 섬유 분산

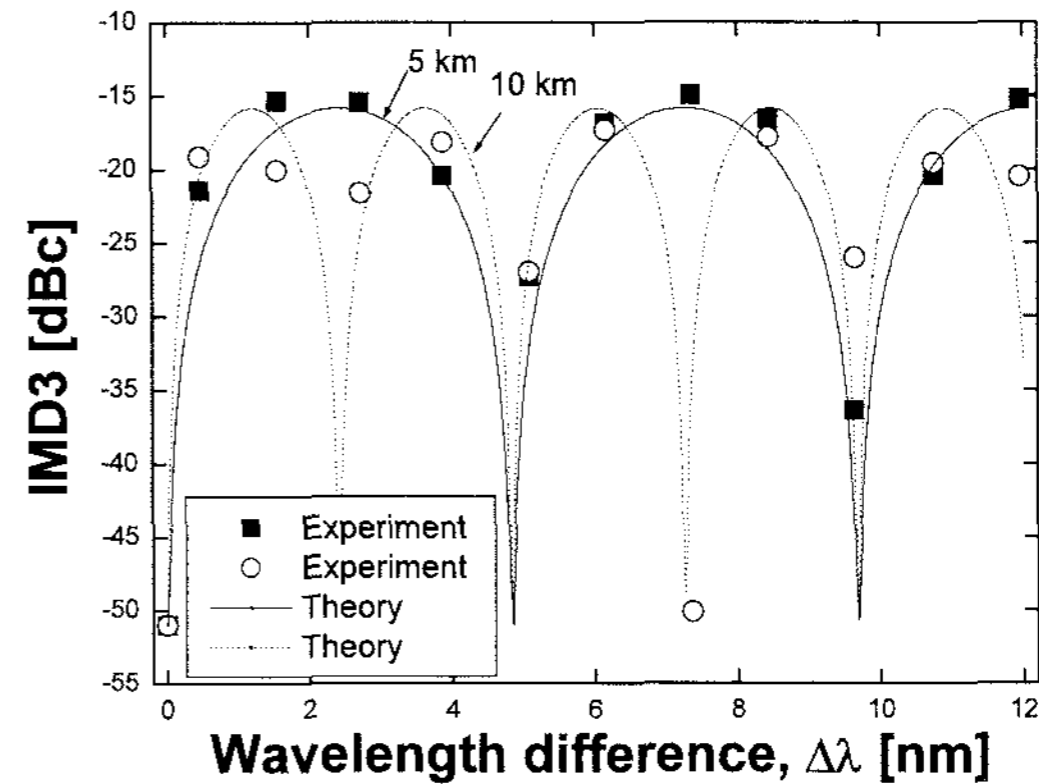


그림 7. 파장차이에 따른 3차 상호변조 왜곡성분의 모의실험 결과와 측정 결과
 Fig. 7. Experimental results and simulation results of IMD3 for various wavelength differences.

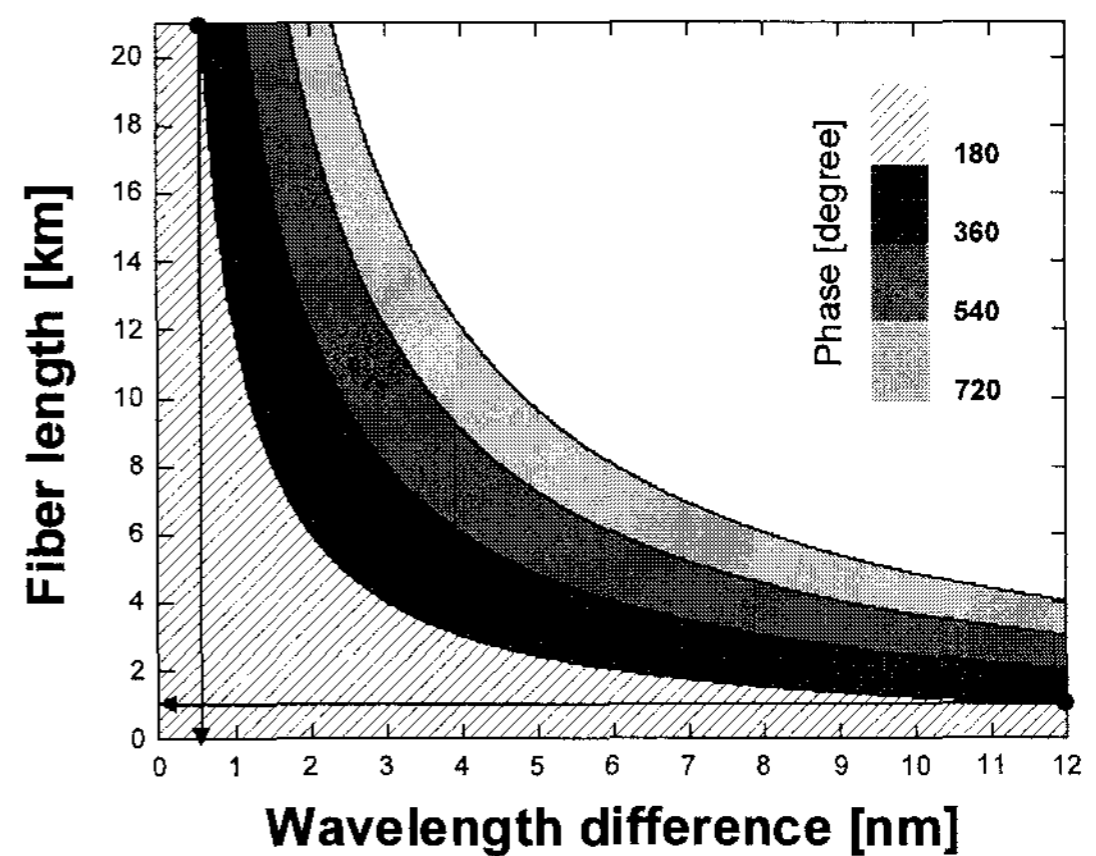


그림 8. 최대 IMD3를 얻기 위한 위상 변위량
 Fig. 8. Phase values for high IMD3.

에 의해 신호의 부정합이 발생했음을 알 수 있다.

IMD3의 억제량은 섬유 분산은 물론 전송거리, 파장차이와 캐리어 주파수에 따라 크게 달라진다. 이로 인해 정확한 신호의 위상을 요구하는 피드포워드 광송신기의 성능 또한 전송 거리와 파장차이에 따라 크게 달라지는 것을 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 통해 확인 할 수 있다. 따라서 그림 1의 A지점에 위상을 조절할 수 있는 위상 천이기를 사용할 경우 위상 천이기의 성능에 따라 IMD3의 억제량이 달라 질수 있는 영역이 존재하게 된다. 식 (5)에 시스템에서 얻을 수 있는 최대 IMD3 크기 값과 메인 신호의 크기(S_0)를 대입하여 정량적인 위상 변위량 $\Delta\phi$ 를 얻을 수 있다.

그림 8은 최대 IMD3 억제량인 31 dBc를 얻을 수 있는 위상 변위량을 파장차이와 전송길이에 따라 계산한 결과이다. 그림 1에서 두 번째 루프의 전기적 지연선로

를 고정한 상태에서 위상 천이기의 위상 가변영역이 180°인 위상 천이기를 사용한다면, 21 km 지점에서 최대 IMD3를 얻기 위해서는 사용하는 레이저 다이오드의 파장차이가 0.65 nm이내여야 함을 알 수 있다.

그리고 광섬유 전송길이가 1 km 이하인 통신망 구조에서 위에서 언급한 위상 천이기를 사용한다면 12 nm 파장차이가 나는 레이저 다이오드들을 사용할 수 있다. 위 결과는 피드포워드 광송신기를 적용한 WDM/SCM RoF 시스템의 설계시 고려해야할 가이드라인을 제시해 준다.

IV. 결 론

레이저 다이오드의 비선형 성분으로 인해 생기는 왜곡 현상을 개선하기 위해 피드포워드 보상기법을 이용하여 광송신기의 선형성을 개선하였다. 광 주입 기법을 이용하여 광송신기의 레이저 다이오드의 파장간격을 조절하여 광 전송길이에 따른 3차 상호변조 왜곡성분의 크기변화를 측정하였다. 피드포워드 광송신기에 사용하는 레이저 다이오드들의 파장차이와 광전송 시스템의 길이에 따른 분산영향은 IMD3의 억제량과 관련 있음을 확인하였으며, 모의실험 결과와 측정 결과를 비교 분석하였다. 또한 파장차이와 전송길이에 상관없이 일정한 상호변조 왜곡성분의 크기를 얻을 수 있는 정량적 위상 변위량을 얻었다. 본 연구실의 실험 결과는 1550 nm대역의 WDM/SCM Radio-over-fiber 시스템에 적용할 수 있으며, 앞으로 차세대 광 전송시스템에도 크게 기여할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] A. J. Cooper, "Fibre/radio for the provision of cordless/mobile telephony services in the access network," *Electron. Lett.*, vol. 26, no. 24, pp. 2054-2056, Nov. 1990.
- [2] Ebine. Y, "Development of fibre-radio systems for cellular mobile communications," *International Tropical Meeting on Microwave Photonics 1999*, Nov. 1999
- [3] L. Roselli, V. Borgioni, F. Zepparelli, F. Ambrosi, M. Comez, P. Faccin, and A. Casini, "Analog laser predistortion for multiservice radio-over-fiber systems," *J. Lightw. Technol.*, vol. 21, no. 5, pp. 1211-1223, May 2003.
- [4] L. S. Fock, A. Kwan, and R. S. Tucker,

"Reduction of Semiconductor Laser Intensity Noise by Feedforward Compensation: Experimental and Theory," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 10, no.12, pp. 1919-1925, Dec. 1992.

- [5] L. S. Fock and R. S. Tucker, "Simultaneous reduction of intensity noise and distortion in semiconductor lasers by feedforward compensation," *Electron. Lett.* vol. 27, no. 14, pp. 1297-1299 July 1991.
- [6] Yon-Tae Moon, Jun Woo Jang, Woon-Kyung Choi, and Young-Wan Choi, "Simultaneous noise and distortion reduction of a broadband optical feedforward transmitter for multi-service operation in radio-over-fiber systems," *optics express*, vol. 15, no. 19, pp. 12167-12173, Sep. 2007.
- [7] R. S. Tucker, "Linearization techniques for wideband analog transmitters," *Broadband Analog and Digital Optoelectronics, Optical Multiple Access Networks, Integrated Optoelectronics, Smart Pixels, LEOS 1992 Summer Topical Meeting Dig.*, pp. 54-55 Aug. 1992.
- [8] T. Ismail, C. P. Liu, J. E. Mitchell, and A. J. Seeds, "Interchannel Distortion Suppression for Broadband Wireless over Fibre Transmission Using Feed-Forward linearised DFB Laser," *Microwave Photonics, 2004 IEEE International Topical Meeting* pp.229-232 Oct. 2004.

저 자 소 개



문 연 태(학생회원)
 2003년 중앙대학교 전자전기
 공학부 졸업.
 2005년 중앙대학교 전자전기
 공학부 석사 졸업.
 2005년~중앙대학교 전자전기
 공학부 박사과정.

<주관심분야 : Microwave Photonics, 광통신,
 RFIC, RF 시스템설계>



최 영 완(정회원)
 1985년 서강대학교 전자공학과
 석사졸업.
 1987년 버팔로 뉴욕주립대(SUNY
 at Buffalo), 전기 및 컴퓨
 터공학과 석사졸업.
 1992년 버팔로 뉴욕주립대(SUNY
 at Buffalo), 전기 및 컴퓨
 터공학과 박사 졸업.

1992년~1995년 한국전자통신연구원(ETRI)
 선임연구원,

1995년~현재 중앙대학교 전자공학과 부교수.

<주관심분야 : 광전자, 광통신, 광스위칭 시스템
 및 소자, Microwave Photonics, Optical CDMA>