

## 연성 광 PCB용 광 배선의 손실특성 및 제작 공차 분석

염준철 · 박대서 · 김영석 · 김대찬 · 박세근 · 오범환 · 이일항 · 이승결<sup>†</sup>

인하대학교 공과대학 정보공학과, 집적형 광자기술 연구센터(OPERA)

☎ 402-751 인천광역시 남구 용현동 253

### 전금수

두산전자 두산기술원

☎ 448-795 경기도 용인시 수지구 성북동 39-3

(2008년 3월 13일 받음, 2008년 8월 19일 수정본 받음, 2008년 8월 19일 게재 확정)

광 백 플레인이나 광 연결용으로 활용될 수 있는 연성 광 PCB의 핵심 요소인 광 배선(도파로)의 전파 특성을 분석하였으며, 광 배선 제작 공정에서 발생할 수 있는 구조적 오차로 인한 전파 손실 발생 문제를 다루었다. 제작 공차 분석을 통해 전파 손실을 -1 dB/mm 이하로 유지하기 위해서는 광 배선 측벽 각도가 1° 이내로 제어되어야 하며, 결합 손실과 구부러짐 손실을 각각 -1 dB 이하로 유지하기 위해서는 광원과 광 배선 간격은 160 μm 이내, 횡방향 정렬 오차는 ±15 μm 이내, 광원 각도는 6° 이하로 정렬되어야 하며, 광 배선의 구부러짐 반경은 5 mm 이상이 되어야 함을 알 수 있었다.

주제어: Optical PCB, Optical coupling, Optical wire, Propagation loss, Ray tracing, Flexible OPCB

## I. 서 론

초고속 대용량 정보 전송이 일반화된 현재의 통신 환경에서는 통신 시스템의 백 플레인(backplane)에서 처리해야 하는 정보량이 수 Gb/s를 넘어서 수 Tb/s 이상으로 증가되고 있으며, 앞으로 더욱 고속화될 것으로 예상된다.<sup>[1-3]</sup> 그러나 기존의 전기 배선을 이용한 백 플레인은 이미 용량 한계에 다다르고 있어 그 대안으로 광 백 플레인에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 광 백 플레인은 전자를 이용하는 전기적 백 플레인에 비해 전송 속도가 1,000배 이상 빠르며 감쇠, 누화(cross-talk), EMI(electromagnetic interference), 신호 지연, 잡음 등의 문제가 거의 없다는 장점을 갖는다.

광섬유 리본을 이용한 광 백 플레인은 이미 상용화되었으며, 광 도파로 층을 PCB(printed circuit board)에 매립하거나 적층시킨 광 PCB(Optical Printed Circuit Board)를 이용하는 광 백 플레인에 대한 연구가 큰 관심을 끌고 있다.<sup>[4-6]</sup> 또한 광 백플레인을 상호 연결하거나, 전자제품의 소형 경량화, 고집적화 및 자유로운 제품 디자인에 대응하기 위해 연성 광 PCB(Flexible Optical Printed Circuit Board: 이하 FOCB라 함)에 대한 관심도 높아지고 있다.<sup>[7-10]</sup> 이러한 FOCB가 향후 상용화 단계에 이르기 위해서는 관련 부품의 저가화 외에도 저가 대량 복제에 의해 광 PCB 제조 단가를 낮추는 것이 핵심일 것이다. 따라서 광 PCB의 대량 복제 공정과 관련한 광 PCB 성능에 대한 공차 분석은 중요한 의미를 갖는다.

FOCB의 디자인 룰과 복제 공정의 제어 기준을 확립하기 위해, 본 연구에서는 상용 프로그램인 LightTools<sup>TM</sup>을 이용하여

FOCB의 핵심 요소인 광 배선(optical wire)의 결합(coupling) 및 전파 특성을 분석하였다.<sup>[11]</sup> 이를 위해 결합 과정의 정렬 오차, FOCB의 장점인 구부러짐(bending)에 의한 영향, 그리고 FOCB의 제작 공정 오차를 고려한 전파 및 손실 특성을 분석하였다. 이하 본문에서 순서대로 상술하고 결과를 논의할 것이다.

## II. FOCB용 광 배선의 분석 과정

그림 1은 본 연구의 대상이 되는 FOCB 개념도 및 내부 광 배선(도파로)의 단면 구조를 나타낸 것이다. 광 부품과 전기 부품을 표면 실장할 수 있는 FOCB 기관 내부에는 다중모드 광 도파로가 형성되어 있으며 이를 광 배선이라 한다. FOCB에서 고속 데이터 통신을 위해서는 광 배선이 사용되며, 저속 데이터 통신이나 전력 전송을 위해 전기 배선이 함께 사용될 수 있다.

그림 왼편에 있는 광원(VCSEL)로부터 방출된 빛은 FOCB 기관 끝에 형성된 45° 거울면에 의해 반사되어 광 배선(도파로)의 코어 내부로 결합되며, FOCB 오른쪽 끝에 형성되어 있는 거울에 의해 다시 반사된 후 최종적으로 광 검출기(PD)에 의해 검출된다. 이때 높은 전송 효율을 얻기 위해 광 배선은 광원이나 검출기 등과 쉽게 정렬될 수 있어야 한다. 광원 및 검출기의 크기 등을 고려하여, 광 배선은 코어 크기가 50×50에서 100×100 μm<sup>2</sup>인 초 다중모드 도파로(super multimode waveguide)가 흔히 사용된다. 또한 embossing(압인)과 같이 금형을 이용한 복제 공정이 가능하기 위해 광 배선으로 풀리며 광 도파로가 일반적으로 사용된다.

<sup>†</sup>E-mail: sglee@inha.ac.kr

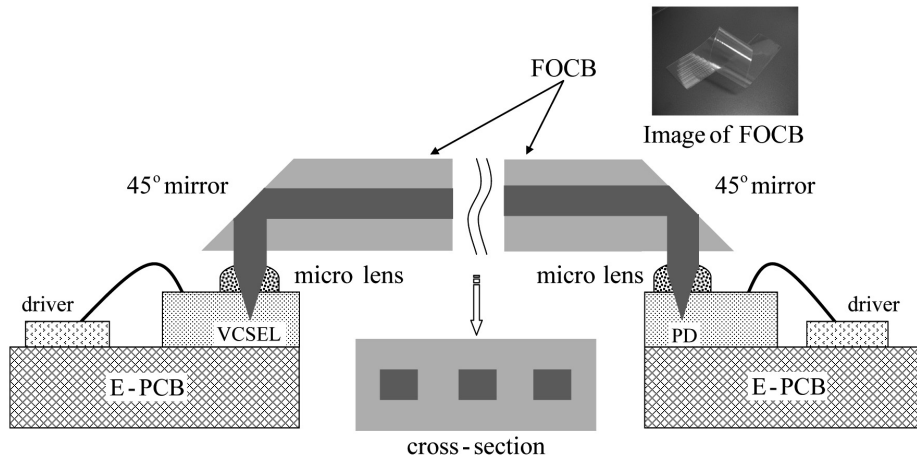


Fig. 1. Schematic diagram of a flexible optical printed circuit board (FOCB).

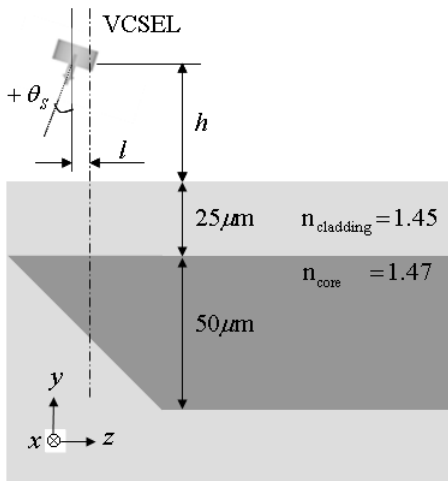


Fig. 2. Schematic diagram of coupling scheme between VCSEL and an optical wire with 45° mirror.

광 배선은 수십 cm 이내의 길이를 가지므로, 신호 분산이 전송 특성에 영향을 미치지 않는 않지만, 결합 손실(coupling loss)이나 전파 손실(propagation loss)은 FOCB의 전송 특성에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 광 배선의 대량 복제 공정에서 발생하는 광 배선 단면의 형태 변형은 전파 손실을 일으켜 결과적으로 전파 특성에 영향을 미치게 될 것이다.

### 2.1. FOCB 구조 및 계산 조건

본 연구에서 사용된 FOCB 입력단과 광 배선 구조는 그림 2와 같다. 광원으로는 VCSEL이 사용되었으며 방출 표면의 직경은 10 μm, 발산각(diversing angle,  $\theta_{div}$ )은 20°이다. 그림에서 VCSEL의 방출 표면은 아래쪽을 향하고 있으며, 거리  $h$  만큼 떨어진 곳에 폴리머 재질의 광 배선이 위치한다. 광 배선의 종단에는 45° 거울면이 형성되어 있으며 광 배선의 전체 길이를 10 cm로 설정하였다. 광 배선의 코어 단면은  $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ 이고 코어의 상, 하부에 있는 클래딩 층의 두께는 25 μm이다. 코어와 클래딩의 굴절률은 각각 1.47, 1.45이다.

FOCB 출력단은 입력단과 거의 동일한 구조를 가지며 VCSEL이 놓인 위치에 광 검출기(PD)가 놓인다는 점만 다를 뿐이다. PD 직경은 80 μm으로서 광 배선의 코어 크기에 비해 상대적으로 크기 때문에 검출 과정에서의 결합 손실은 고려하지 않는다. 이러한 값들은 실제 FOCB 제작에 사용되는 값들을 토대로 설정하였다.

그림 2에서 일점쇄선으로 표현된 수직선은 광 배선 끝에 형성된 45° 거울면의 중심을 지나는 직선으로, 이 선상에 VCSEL이 놓일 경우 횡방향(z 축) 정렬 오차가 0이 된다. 그러나 그림에서는 VCSEL이 -z 축 방향으로  $l$  만큼 수평 이동되어 있는 상태를 보여주고 있다. 또한 VCSEL 방출표면은 수직 하향에 대해 x축을 회전축으로 하여 각도  $\theta$ , 만큼 회전된 방향을 향하고 있으며, 이때 시계 방향의 회전각을 양수로, 그 반대 방향을 음수로 표현한다. 한편, 분석 과정에서 코어의 구성 물질에 의한 광선의 흡수나 경계면 거칠기에 의한 산란은 전혀 고려하지 않는다.

### 2.2. 광 배선의 전파 특성 분석 방법

광 배선과 같은 초 다중모드 도파로의 분석에 있어서 기존의 광 기능 소자나 도파로 소자 분석에 사용되던 beam propagation method(BPM), finite element method(FEM), 혹은 finite difference-time domain method(FD-TD) 등은 적절한 수단이 되지 못한다. FOCB의 광원으로 활용되는 VCSEL의 출력 파장은 850 nm로서 코어 크기는 이와 비교하여 60배 이상으로 크고, 광 배선과 VCSEL/PD 간의 광 결합(optical coupling)에 렌즈와 같은 광학 소자들이 이용되기 때문이다. 즉, 계산의 효율성 문제와 전체 시스템의 분석에 있어서 호환성 문제가 야기된다.

본 연구에서 다루는 광 배선은  $50 \times 50 \mu\text{m}^2$  크기의 코어 단면을 가지는 도파로로서, FEM 기반의 상용 프로그램인 FEMLAB (COMSOL사)으로 모드 수를 구해 보면, 약 1,000개 이상이 됨을 알 수 있다. 따라서 이러한 초 다중모드 광 도파로를 포함하는 FOCB 시스템 전반에 관한 분석에는 빛을 광선들로

간주하는 광선 추적법이 매우 효과적인 대안이 될 것이다. 실제로 초 다중모드 광 도파로의 특성과 이를 실장한 광 PCB의 결합 손실 및 정렬 공차를 분석하기 위해 광선 추적법이 활용된 바 있으며, 그 결과가 실험 결과와 잘 일치한다는 사실도 확인되었다.<sup>[12]</sup> 또한 초 다중모드 광 도파로에서 코어-클래딩 경계면의 거칠기에 의한 산란 손실을 분석하기 위해 광선 추적법이 활용된 사례도 있다.<sup>[13]</sup>

### 2.3. 입력 광원의 모델링

광선 추적법을 이용하여 광소자 특성을 분석하는 경우 입력광원의 모델링에 따라서 결과가 달라질 수 있으므로, 광 배선의 전파 특성을 분석하는 과정에서도 광원의 적절한 모델링은 매우 중요하다. 광섬유 혹은 VCSEL의 출력단에서 방출되는 빛은 일반적으로 Gaussian 광속 특성을 가지므로, 이러한 출력광 패턴을 전산 모사(simulation)하기 위해 다음과 같은 방법으로 광원을 모델링하였다.

우선 광원의 방출 단면을 작은 영역들로 분할하고, 각 영역에서 출력되는 광선 수를 분할된 영역 면적에 비례하도록 설정하였다. 그리고 각 영역 표면에서 방출되는 광선은 방출각이 0°(수직 방출)인 방향으로 가장 많이 방출되며, 방출각이 점차 커짐에 따라 광선이 점차 감소하는 방식으로 방출각에 따른 광선 방출 확률을 조정하였다. 이때 광선의 방출 확률은 각도에 따라 Gaussian 함수에 비례하여 감소하며, 각도별 방출 광선 수가 최대값의 1/e로 감소하는 각도를 광원의 발산각  $\theta_{div}$ 로 정의하였고 최대 방출각을 발산각의 2배 이내로 한정하였다.

그림 3(a)는 다중모드 850 nm VCSEL chip의 방출면으로부터 방출된 빛의 far-field pattern을 beam profiler로 측정된 결과이다. VCSEL의 방출면 직경은 10  $\mu\text{m}$ 이며, 원형의 방출면으로부터 20°의 발산각을 가지고 빛이 방출된다. 그림 3(b)는 제안한 방법을 이용하여 동일한 조건의 VCSEL로부터 방출되는 광속을 모델링한 결과로서 그림 3(a)의 실제 방출분포와 유사한 분포를 얻을 수 있었다. far-field pattern에 관한 결과를 상호 비교한 것이므로, 그림 3에서 가로축 좌표는 특

별한 의미를 가지지 않는다.

### 2.4. 경계면의 처리 방식

코어 내를 따른 빛의 전파 과정을 광선 추적법으로 전산 모사하기 위해서는 코어-클래딩 경계면에서의 반사율을 정량적으로 계산하여, 반사 광선의 세기를 조정하거나 확률적으로 광선의 반사 여부를 판별해야 한다. 그러나 상용 프로그램인 LightTools™에서는 경계면에서의 반사율을 물리 광학적으로 계산하지 못한다. 경계면에 입사된 광선에 대해 전 반사 조건의 만족 여부만으로 광선의 반사 여부를 결정하거나, 전반사 조건을 만족하지 못하는 경우에는 사용자에게 의해 입력된 고정 반사율 값을 갖는 것을 가정하여 광선의 반사 및 투과 여부를 결정하게 된다.

비록 LightTools™ 프로그램이 상기와 같은 문제점을 가지고 있지만, 광 배선 내에서 전반사를 만족하지 못하는 광선은 결국 소멸된다는 점을 고려한다면 LightTools™ 프로그램으로 코어 내부를 따라 진행하는 빛의 전파를 다룰 수 있을 것이다. 이를 확인하기 위해 LightTools™ 프로그램이 지원하는 두 가지의 경계면 처리 방식을 각각 적용하여 빛의 전파를 전산 모사하였으며 결과를 비교하였다.

첫 번째 경계면 처리 방식은 Transmitted/TIR Rays 방식으로서, 경계면에서 전반사 조건을 만족하지 못하는 광선은 무조건 소멸되는 것으로 간주하는 방식이다. 두 번째 방식은 Split Rays 방식으로서, 전반사 조건을 만족하는 경우에 광선의 입사 조건에 관계없이 고정된 반사율을 갖는 것으로 가정하여 광선의 소멸 여부 혹은 반사 여부를 판별하는 것이다. 첫 번째 방식의 경우 코어-클래딩 경계면에서의 전반사 조건(기하광학적인 관점에서의 도파 조건)을 만족하지 못하는 광선은 광 배선의 입력단 근방에서 모두 소멸될 것이다. 두 번째 방식의 경우는 고정된 반사율 값을 높게 설정함에 따라 전반사 조건을 만족하지 못하는 광선이 코어 내부를 더 멀리 진행하게 되지만, 결국 전반사 조건을 만족하지 못하는 광선은 모두 소멸될 것이다. 물론 두 가지 방식 모두 다 실제 코어 내에서 일어나는 현상을 정확히 반영하지는 못하지

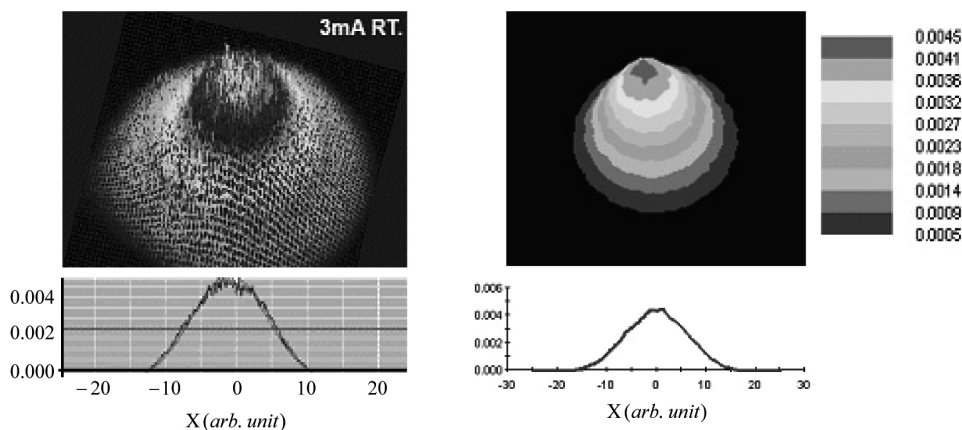


Fig. 3. Comparison of far-field intensity patterns of VCSEL, (a) measured and (b) numerically simulated results.

만, Split Rays 방식이 실제 현상에 좀 더 가까운 결과를 제공하게 될 것이다.

입력된 광선들이 광 배선의 코어를 따라 진행되는 과정에서 두 가지 경계면 처리 방식에 따라 광선 수가 어떻게 감소하는지를 계산하여 그림 4에 나타내었다. 이때, VCSEL은 직각 단면을 가진 광 배선 입력단 끝에 위치한다고 가정하였으며, VCSEL의 발산각은 20, 30, 40°라고 각각 설정하였다.

그림 4에서 실선으로 연결된 결과는 Transmitted/TIR rays 방식을 적용한 결과이고, 점선으로 연결된 결과는 고정 반사율을 30%로 설정하고 Split Rays 방식을 적용한 결과이다. 수직축의 투과 출력(transmitted power)은 광 배선의 길이 방향으로 각 코어 단면에 존재하는 광선 수를 입사 광선의 총수로 나눈 것으로서, 소멸되지 않고 진행되는 광선이 어느 정도인지를 알려 준다. 이미 예상한 것처럼, VCSEL의 발산각에 관계없이 Split Rays 방식을 적용한 경우에 광선의 소멸이 더디게 일어남을 알 수 있었다. Split Rays 방식의 결과를 보면 광 배선을 따라 4,000 μm 이상의 거리를 진행한 광선들은 더 이상 소멸되지 않고 그 수가 일정하게 유지됨을 알 수 있는데, 이를 광 배선의 안정화 거리라 정의하였다.

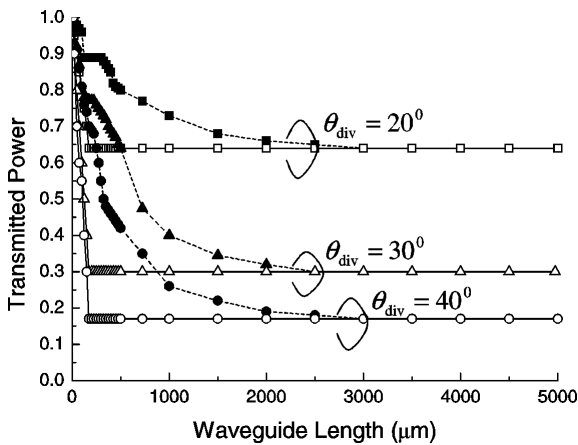


Fig. 4. Variation of the stabilized distance to the divergence angle of VCSEL and the boundary condition applied to the core-cladding boundary.

LightTools™ 프로그램이 경계면에서 광선의 반사 투과 현상을 정확히 취급하지 못하지만, 안정화 거리를 진행한 이후의 광선들은 모두 도파조건을 만족하는 광선들로 취급할 수 있으며, 어떤 이유로 인해 이들 광선이 소멸된다면 이를 전파 손실로 간주할 수 있을 것이다. 본 연구에서 언급한 전파 손실은 코어 단면에 존재하는 광선 수를 안정화 거리를 진행한 직후의 광선 수로 나눈 것이며, 그 값이 dB로 표현된 경우는 일반적인 decibel 정의에 따라 환산한 것이다.

상기 계산을 위해 입력 광선 수는 10만개에서 100만개까지 사용되었으나, 입력 광선 수가 10만 이상이면, 계산 결과는 광선 수의 많고 적음과 무관함을 확인하였다. 따라서 차후 계산에서 입력 광선 수는 10만개로 설정하였다.

### III. 광 배선의 손실 특성 및 제작 공차 분석

#### 3.1. 광 배선의 결합 손실

FOCB 구현에서 가장 중요한 부분은 FOCB 양단의 VCSEL과 광 배선 그리고 광 배선과 PD간의 효과적인 광 결합을 실현하는 것이다. 결합 과정에 의한 손실을 나타내는 결합 손실은  $L_c = 10 \log(P_{out}/P_{in})$ 로 정의되며, 이때  $P_{in}$ 은 광원으로 부터 방출되는 광 파워를,  $P_{out}$ 은 광 배선에 결합된 빛의 광 파워를 의미한다. 광선 추적법을 이용하여 결합 손실을 분석하므로,  $P_{in}$ 은 VCSEL의 방출면으로부터 방출된 광선 수가 되며,  $P_{out}$ 은 광 배선에 결합되어 안정화 거리를 진행한 이후 코어 단면에 존재하는 광선 수가 된다.

실제 FOCB의 광 손실은 광 결합 과정에서 주로 일어나므로 결합 과정의 정렬 공차를 확보하는 것이 매우 중요하다. 결합 손실의 요인으로 여러 가지가 있지만 본 연구에서는 광원(VCSEL) 방출면과 광 배선의 간격( $h$ ), 횡방향의 정렬 오차( $l$ ), VCSEL 방출 방향의 틀어짐 각도( $\theta_s$ )에 따른 결합 손실을 다루었다. 계산과정에서 광 배선 자체의 흡수나 산란에 의한 전파 손실은 없는 것으로 가정하였다.

계산된 결과는 그림 5와 같다. 우선 VCSEL 방출면과 광 배선의 간격  $h$ 에 따른 결합 손실의 변화를 살펴보았으며, 그림 5(a)로부터  $h$ 가 75 μm 이상이 되면 결합 손실이 발생하

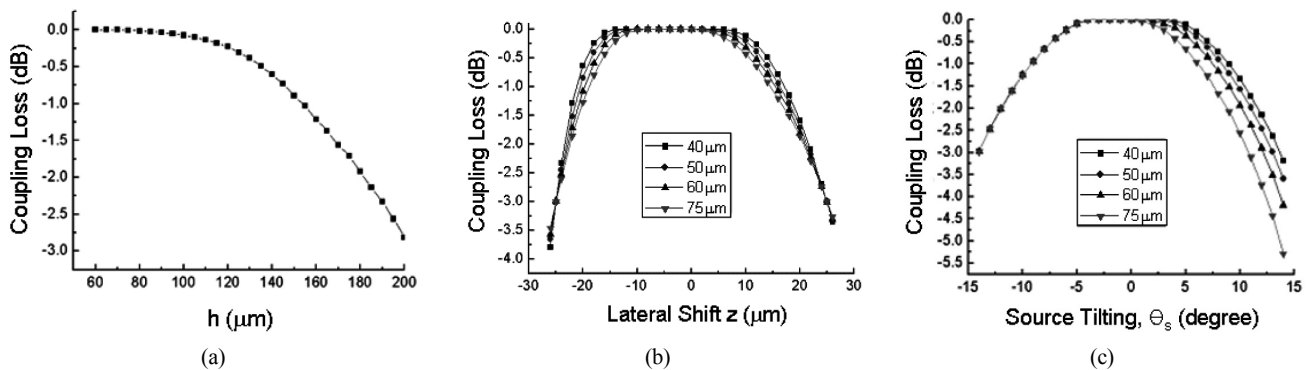


Fig. 5. Variation of coupling losses between VCSEL and optical wire to coupling conditions; (a) gap between VCSEL and cladding layer, (b) lateral misalignment, and (c) angular mismatch.

기 시작함을 알 수 있다. 특히  $h$ 가 160  $\mu\text{m}$  이상이 되면, -1 dB 이상의 결합 손실이 발생하게 된다. 따라서 간격  $h$ 는 75  $\mu\text{m}$  이내로 유지해야 함을 알 수 있었다. 다음으로 간격  $h$ 가 40, 50, 60, 75  $\mu\text{m}$ 일 때 횡방향 정렬 오차와 VCSEL 방출 방향의 틀어짐 각도에 따른 결합 손실을 살펴보았으며, 각 결과는 그림 5(b)와 5(c)와 같다. 5(b)로부터 횡방향( $z$ 축)의 정렬 오차가  $\pm 15 \mu\text{m}$ 이내이면, -1 dB 이하의 손실이 발생함으로 알 수 있었다. 또한 그림 5(c)로부터 VCSEL 방출 각도가  $6^\circ \sim 9^\circ$  이상 기울어지면, -1 dB의 결합 손실이 발생함을 볼 수 있다. 실제 FOCB 조립 공정에서 VCSEL 방출 각도가  $6^\circ$  이상 기울어지는 것은 흔치 않은 경우이므로 수직 및 수평 정렬 오차가 결합 손실에 상대적으로 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

### 3.2. 광 배선의 구부러짐 손실(bending loss)

FOCB의 유연성 때문에 구부러짐과 휨(twist) 현상이 나타날 수 있으며 이러한 변형은 전파 손실의 한 원인이 된다. FOCB가 구부러짐을 보일 때, 구부러진 부분의 곡률반경에 따른 전파 손실의 증가를 분석하였으며 이러한 분석 결과는 FOCB의 사용 환경 혹은 조건을 결정하는데 반드시 필요한 정보가

될 것이다.

그림 6(a)는 전산 모사를 위해 구부러짐을 모델링한 FOCB 구조이다. 구부러진 부분의 양 끝에 직선 광 배선이 연결되어 있으며, 이들은 입력부 및 출력부에 해당한다. 입력부에 해당하는 광 배선의 길이는 안정화 거리인 4,000  $\mu\text{m}$  이상이 되도록 하였으며, 이렇게 함으로써 구부러진 부분에 입사되는 빛은 모두 도파 모드(guided mode)가 된다. 구부러진 부분의 곡률 반경(bending radius)을  $R$ 이라 하면, 구부러진 부분의 길이는 반원 길이인  $\pi R$ 이 된다. 구부러진 부분을 통과한 광선들은 출력부에 해당하는 직선 광 배선에 결합된다. 이때 결합된 빛 중의 일부는 직선 광 배선의 도파 모드가 아닐 수 있으므로 광 배선을 진행함에 따라 일부의 광선은 소멸될 것이다.

구부러진 부분으로 인한 전파 손실의 추가 발생 정도를 정량화하기 위해 구부러짐 손실을  $L_B = 10 \log(P_{out}/P_{in})$ 와 같이 정의하였다. 식에서  $P_{in}$ 은 구부러진 부분에 입사하는 광선 수를 의미하고,  $P_{out}$ 은 출력부에 해당하는 직선 광 배선에 결합되고 다시 안정화 거리를 진행한 이후에 코어 단면에 존재하는 광선 수를 의미한다. 이렇게 함으로써 구부러진 부분 때문에 도파조건을 만족할 수 없게 되는 광선들이 얼마나 많은가를 판단할 수 있을 것이다.

곡률반경  $R$ 을 1에서 30 mm까지 변화시키면서 구부러짐 손실을 계산한 결과는 그림 6(b)와 같다. 구부러짐 손실이 -1 dB를 나타내는 곡률반경은 약 5 mm이며, 곡률반경을 더 줄이면 손실이 급격히 증가하는 특성을 확인할 수 있었다. 곡률반경이 10 mm를 넘는 경우에는 손실이 -0.5 dB 이하에서 안정적인 전파특성을 보인다. 이 결과로부터 FOCB를 사용할 때, 구부러짐 반경이 5 mm 이하가 되지 않도록 해야 함을 알 수 있다.

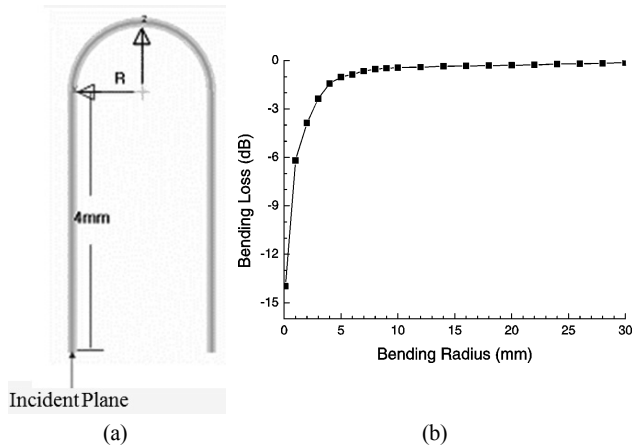


Fig. 6. (a) Schematics of a bent optical wire and (b) variation of its bending loss to the bending radius.

### 3.3. 광 배선의 제작 공차 분석

FOCB용 광 배선을 hot embossing(열 압인)공정으로 대량 복제하는 경우, 광 배선의 구조적 변형이 발생할 수 있으므로 이로 인한 전파 손실을 광선 추적법으로 분석하였다. 그림 7(a)에 이상적인 광 배선의 단면 구조와 비교하여 실제 hot embossing 공정 시 발생할 수 있는 두 가지 대표적인 구

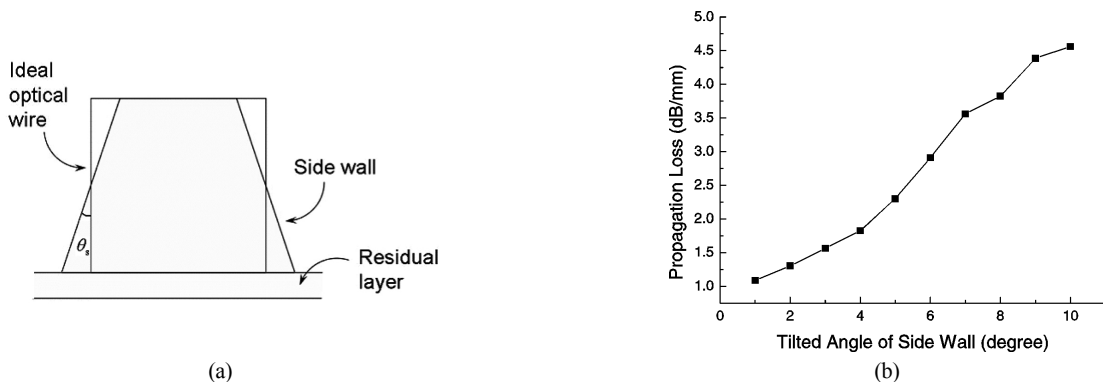


Fig. 7. (a) Cross-sectional deformation of an optical wire and (b) variation of the propagation loss to the sidewall angle.

조 변화를 보였다. 하나는 광 배선의 양 측벽(sidewall)이 기울어져 사다리꼴 형태가 되는 것이고, 다른 하나는 불안정한 공정으로 도파로 아랫면에 잔류층(residual layer)이 나타나는 것이다. 이 두 가지 경우 중에서 잔류층에 의한 영향은 광선 추적법으로 분석하는 것은 적절하지 않으므로, 단면 구조가 정사각형에서 사다리꼴로 변형되는 경우의 영향만을 다루었다. 일반적으로 잔류층 두께는 수  $\mu\text{m}$ 이므로 잔류층이 전파에 미치는 영향을 분석하기 위해서는 파동광학적인 취급이 필요하다.

복제 공정에 의해 단면의 측벽 각도(sidewall angle)  $\theta_s$ 가 변화하더라도 단면적은 일정하게 유지된다고 가정하고,  $\theta_s$  변화에 따른 전파 손실을 구하여 그림 7(b)에 보였다. 이때 광 배선을 따라 빛이 각각 4,000와 7,000  $\mu\text{m}$ 를 진행하였을 때, 각 코어 단면에 존재하는 광선 수를 비교하여 전파 손실을 결정하였다.

결과로부터  $\theta_s$ 가 클수록 전파 손실이 증가하는 경향을 볼 수 있다. 전반사 조건을 만족하던 광선들이 측벽이 기울어짐에 따라 더 이상 도파 조건을 만족하지 못하게 되어 손실로 나타났으며, 각도가 클수록 손실되는 양도 증가하였다. 1,000  $\mu\text{m}$  전파거리에 대하여  $\theta_s$ 가  $1^\circ$ 일 때 -1 dB 손실이 일어나는 것을 볼 수 있다. 역사다리꼴 형태에 대해서도 같은 분석을 수행하였으며 동일한 결과를 얻을 수 있다. 이상의 결과로부터 단면 변형이 전파 손실에 큰 영향이 미칠 수 있으므로 광 배선의 대량 복제 공정 과정에서 측벽 각도에 대한 엄격한 제어가 필요함을 알 수 있었다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 광선 추적법을 활용하여 FOCB와 그 핵심 요소인 광 배선의 전파 특성을 분석하였으며, 이를 위해 광원 모델링과 경계면의 처리 방법을 논하였다. 분석을 통해 FOCB 광 결합 구조의 결합 손실 및 공차, 광 배선의 구부러짐 손실 그리고 광 배선의 단면 형태 변화에 따른 손실 발생 정도를 살펴보았다. 제작 공차 분석을 통해 전파 손실을 -1 dB/mm 이하로 유지하기 위해서는 광 배선의 측벽 각도가  $1^\circ$  이내로 제어되어야 함을 알 수 있었다. 또한 결합 손실과 구부러짐 손실을 각각 -1 dB 이하로 유지하기 위해서는 광원과 광 배선 간격은 160  $\mu\text{m}$  이내, 횡방향 정렬 오차는  $\pm 15 \mu\text{m}$  이내, 광원 각도는  $6^\circ$  이내로 정렬되어야 하며, 광 배선의 구부러짐 반경은 5 mm 이상이 되어야 함을 알 수 있었다.

전파 특성 분석을 통해 특정한 목적을 위해 요구되는 FOCB의 전송 규격에 맞춰 광 배선의 성능 즉, 최대 허용손실, 크기, 형태 등의 요구조건에 최적화된 FOCB를 규격화 할 수 있으며, 공정상에서 허용되는 오차 등을 예측할 수 있으므로 광 PCB에서 광 배선의 디자인 룰을 확립할 수 있을 것으로 기대한다. 한편 광 배선 복제 과정에서 발생하는 잔류층 영향은 파동광학적인 관점에서 다루어져야 할 것이라 본다.

#### 감사의 말

본 연구는 한국과학재단 우수 연구센터 사업인 집적형 광자기술 연구센터(R11-2003-022) 및 두산전자의 부품소재기술개발사업(과제명: 고화질 및 휴대 디스플레이용 Flexible 광회로 기판의 개발, 과제번호: 10017252)의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

#### 참고문헌

- [1] J. W. Goodman, F. I. Leonberger, S. -Y. Kung, and R. A. Ahale, "Optical Interconnections for VLSI Systems," *Proceedings of IEEE*, vol. 72, no. 7, pp. 850-866, 1984.
- [2] E. Griesse, "A high-performance hybrid electrical-optical interconnection technology for high-speed electronic systems," *IEEE Transactions on advanced packaging*, vol. 24, no. 3, pp. 375-383, 2001.
- [3] E. -H. Lee, S. G. Lee, B. H. O, and S. G. Park, "Optical Printed Circuit Board (O-PCB): A New Platform toward VLSI Micro/Nano-Photonics?," *IEEE 2004 Digest of LEOS Summer Topical Meetings*, pp. 21-22, 2004.
- [4] H. Takahara, "Optoelectronic multichip module packaging technologies and optical input/output interface chip-level packages for the next generation of hardware systems," *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics*, vol. 9, no. 2, pp. 443-451, 2003.
- [5] M. Stach, "10 Gbit/s Data Transmission Experiments over Optical Backplane Waveguides with 850 nm Wavelength Multimode VCSELs," *Annual Report, Optoelectronics Department, University of Ulm*, 2002.
- [6] M. A. Shahid and W. R. Holland, "Flexible optical backplane interconnections," *Proceedings of MPPOI'96*, pp. 178-185, 1996.
- [7] L. -C. Shen, W. -C. Lo, H. -H. Chang, H. -C. Fu, Y. -C. Lee, Y. -C. Chen, S. -M. Chang, W. -Y. Chen, and M. -C. Chou, "Characterization of organic multi-mode optical waveguides for electro-optical printed circuit boards (EOPCB)," *Circuit World*, vol. 32, no. 1, pp. 8-15, 2006.
- [8] E. -H. Lee, "Hard and flexible optical printed circuit board (OPCB) using micro/nano-imprinting of polymer optical waveguides," *SPIE Photonic West 2008*, vol. 6897, 2008.
- [9] 염준철, 박현용, 이승걸, 오범환, 박세근, 이일항, 전금수, 이민수, "연성 광 PCB 구현을 위한 다중모드 optical wire의 전파특성 분석", *Photonics Conference 2006*, pp. 436-437, 2006.
- [10] H. -S. Lee, S. -M. An, S. G. Lee, B. -H. O, and E. -H. Lee, "Fabrication of a 10 Gbps/ch flexible optical printed circuit board (FO-PCB)," *SPIE Photonics West 2007*, vol. 6476, 2007.
- [11] LightTools™, Optical Research Associates, 2001.

- [12] Jing Yuan, Fengguang Luo, Xinjun Zhou, Qirui Huang, Mingcui Cao, "Optical interconnection in embedded-fiber printer circuit boards," *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, In Press, Corrected Proof, Available online, 2006.
- [13] T. Bierhoff, Amir Wallrabenstein, Andreas Himmler, Elmar Griese, and Gred Mrozynski, "Ray tracing technique and its verification for the analysis of highly multimode waveguides with rough surfaces," *IEEE trans. magn.*, vol. 37, pp. 3307-3310, 2001.

## Propagation Characteristics and Tolerance Analysis of Optical Wires in Flexible Optical PCB by Ray Tracing

Jun-Cheol Yeom, Dae-Seo Park, Young-Seok Kim, Dae-Chan Kim, Se-Geun Park, Beom-Hoan O,  
El-Hang Lee, and Seung Gol Lee<sup>†</sup>

*School of Information Engineering, Optics and Photonics Elite Research Academy (OPERA), Inha University, 253 Yonghyun-dong,  
Nam-gu, Incheon 402-751, Korea*

<sup>†</sup>*E-mail: sglee@inha.ac.kr*

Keumsoo Jeon

*Doosan Technical Center, Doosan Electro-Materials, 39-3, Sungbok-Dong, Suji-Gu, Yongin-Si, Gyeonggi-Do 448-795, Korea*

(Received March 13, 2008; Revised manuscript August 19, 2008; Accepted August 19, 2008)

In this study, the propagation characteristics and the fabrication tolerance of an optical wire in a flexible optical PCB were analyzed by using a ray-tracing method. It is found from the analysis that the sidewall angle of a core should be controlled within 1° in order to maintain the propagation loss to less than -1 dB/mm, and that the bending radius of the optical wire should be larger than 5 mm in order to suppress the bending loss below -1 dB. In addition, it is confirmed that the lateral misalignment of  $\pm 15 \mu\text{m}$ , and the angular tilting of VCSEL of 6° are allowable for the coupling loss of -1 dB.

OCIS codes: (060.0060) Fiber optics and optical communications; (230.7370) Waveguides; (250.5460) Polymer waveguides-fibers.