

Optical Design of an Integrated Two-Channel Optical Transmitter for an HDMI interface

Hyun-Jae Yoon^{1†} and Hyun-Seo Kang²

¹Department of Optical Communications Engineering, Gwangju University,
277 Hyodeok-ro, Nam-gu, Gwangju 503-703, Korea

²ETRI, 176-11 Cheomdangwagi-ro, Buk-gu, Gwangju 500-470, Korea

(Received August 17, 2015; Revised manuscript September 15, 2015; Accepted September 18, 2015)

In this paper we design the optical system for an integrated two-channel TO-type optical transmitter to apply the HDMI interface using the code V simulator. The proposed integrated two-channel optical transmitter has two VCSELs attached in parallel on an 8-pin TO-CAN package, on top of which is a lens filter block (1 mm × 2 mm × 4mm) composed of hemispherical lenses and WDM filters. Considering two-channel transmitters manufactured with wavelength combinations of 1060nm/1270nm and 1330nm/1550nm, we obtain the optimum value of the diameter of the hemispherical lens as 0.6 mm for both combinations, and the distances L between the lens filter block and ball lens as 1.7 mm and 2.0 mm for the 1060nm/1270nm and 1330nm/1550nm wavelength combinations, respectively. At this time, the focal length f_0 of the lens filter blocks for wavelengths of 1060, 1270, 1330, and 1550 nm are 0.351, 0.354, 0.355, and 0.359 mm, respectively, and the focal lengths F of light passing through the lens filter block and ball lens are 0.62 mm for 1060nm/1270nm and 0.60-0.66 mm for 1330nm/1550nm wavelength combinations.

Keywords: WDM, Integrated module, HDMI, OSA, CODE V

OCIS codes: (230.3120) Integrated optic devices; (060.0060) Fiber optics and optical communications

광 HDMI 인터페이스용 2채널 광송신기 광학 설계

윤현재^{1†} · 강현서²

¹광주대학교 광통신공학과
☎ 503-703 광주광역시 남구 효덕로 277

²한국전자통신연구원
☎ 500-470 광주광역시 북구 첨단과기로 176번길 11

(2015년 8월 17일 받음, 2015년 9월 15일 수정본 받음, 2015년 9월 18일 게재 확정)

본 논문에서는 code V 시뮬레이터를 이용하여 광 HDMI 인터페이스에 적용하기 위한 집적형 2채널 TO 구조 광송신기의 광학 설계 설계를 하였다. 제안된 집적형 2채널 TO 구조 광송신기는 지름의 6.4 mm인 하나의 8 pin TO-CAN 패키지 안에 2개의 VCSEL을 평행하게 부착하고 그 위에 반구(hemisphere) 렌즈가 부착된 직육면체 모양(1 mm(H) × 2 mm(W) × 4 mm(D))의 렌즈 필터 블록 (lens filter block) 을 올려놓은 구조이다. 집적형 2채널 TO 구조 광송신기 제작 시 1060 nm/1270 nm와 1330 nm/1550 nm로 두 개 파장씩 묶어 TO-CAN 형태로 제작하므로, 이들 파장 조합에서 반구 렌즈의 지름은 0.6 mm, 볼 렌즈와 렌즈 필터 간격(L)은 파장 1060 nm/1270 nm 조합의 경우 1.7 mm, 파장 1330 nm/1550 nm 조합의 경우 2.0 mm일 때 최적의 결과를 얻을 수 있었다. 이때 렌즈필터 블록의 초점거리(f_0)는 1060 nm, 1270 nm, 1330 nm, 1550 nm 파장에 대하여 0.351 mm, 0.354 mm, 0.355 mm, 0.359 mm이었으며 렌즈 필터 블록과 볼 렌즈를 통과한 빛의 초점 위치(F)는 파장 1060 nm/1270 nm 조합의 경우 0.62 mm, 파장 1330 nm/1550 nm 조합의 경우 0.60 mm ~ 0.66 mm이었다.

Keywords: WDM, 집적형 광모듈, HDMI, OSA, CODE V

OCIS codes: (230.3120) Integrated optic devices; (060.0060) Fiber optics and optical communications

[†]E-mail: hjyoon@gwangju.ac.kr

I. 서 론

HDMI (High Definition Multimedia Interface) 는 기존의 DVI (Digital Visual Interface) 에서 좀 더 진보된 화상 전송 방식으로 압축을 하지 않는 모든 디지털 오디오/비디오 인터페이스로서 셋탑 박스, DVD 플레이어 등의 오디오/비디오 소스와 디지털 TV와 같은 플레이어 간의 인터페이스를 제공한다. 또한 디지털 영상신호 전송 규격인 DVI의 프로토콜을 유지하며 음성신호를 동시에 전송할 수 있고 커넥터 크기가 작으며 복제 방지가 가능하다는 장점이 부각되며 전자제품의 디지털 인터페이스 표준으로 정착되고 있다^[1].

이러한 HDMI 인터페이스는 1080p급 프로젝터 등 고화질 전송을 위한 데이터 증가와 대중용 화상 시스템, 산업용/의료용 화상 시스템 등 원거리 전송이 필요한 시장이 증가하고 있으며 이를 지원하기 위하여 전기적 인터페이스에서 광 인터페이스로 전환이 시도되고 있다. 광 HDMI 인터페이스는 광통신을 이용하여 화상 신호를 전송하므로 원거리 (500 m 이상) 전송이 가능하고 한 대의 컴퓨터로 여러 장소에 화상 신호를 주고받는 실시간 양방향 통신이 가능하다. 또한 광 신호 전송에서는 전자파 간섭이 발생되지 않아 데이터 왜곡이나 장비의 오작동이 크게 문제되는 의로기기, 비행기 등에서의 디스플레이의 신호 전송이 가능하며 제품의 크기 및 무게를 크게 감소시킬 수 있어 휴대, 설치 및 이동이 용이하다.

현재 광섬유를 이용한 DVI, HDMI 등의 멀티미디어 전송 기기들은 대부분 여러 개의 광섬유와 CEC, DDC 신호 전송에 필요한 전기선을 함께 사용하고 있다. 향후 광 HDMI 인터페이스 시장은 디스플레이 데이터 용량의 증가로 장거리 대용량 정보를 전송할 수 있고 저가격 집적형 구조를 갖는 제품이 시장을 주도할 것으로 예상된다^[2-5].

본 논문에서는 code V 시뮬레이터를 이용하여 광 HDMI 인터페이스에 적용하기 위한 집적형 2채널 TO 구조 광송신기의 광학적 설계를 하였다. 집적형 2채널 TO 구조 광송신기는 하나의 TO-CAN 패키지 내에 2개의 VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) 과 렌즈 필터를 집적시킨 형태로써 이러한 TO-CAN 패키지 2개를 WDM 필터를 사용하여 수직으로 연결할 경우, 대용량 HDMI 4채널 신호를 하나의 광섬유로 장거리 전송할 수 있으며 제품 크기를 줄일 수 있다는 장점이 있다^[6].

II. 집적형 2채널 TO 구조

집적형 2채널 TO 구조 광송신기는 Fig. 1과 같이 지름의 6.4mm인 하나의 8 pin TO-CAN 패키지 안에 2개의 VCSEL 을 평행하게 부착하고 그 위에 반구(hemisphere) 렌즈가 부착된 직육면체 모양(1 mm(H) × 2 mm(W) × 4 mm(D))의 렌즈 필터 블록 (lens filter block) 을 올려놓은 구조이다. 렌즈 필터 블록에서 한 VCSEL에서 방출되는 파장은 그대로 통과하여 진행하고 다른 VCSEL에서 방출되는 빛은 WDM (wavelength division multiplexer) 필터에서 2번 반사하여 같

은 경로로 진행하게 된다.

일반적으로 양방향 광모듈 제품 제작에 많이 사용되는 방법과 같이 WDM 필터를 45도로 부착하고 집적형 2채널 TO-CAN 패키지 2개를 수직으로 연결하여 Fig. 2와 같은 HDMI용 4채널 광모듈을 제작할 수 있다. 본 연구에서는 하나의 집적형 2채널 TO 구조에 1060 nm과 1270 nm 파장의 VCSEL을 사용하고 다른 하나의 TO 구조에 1330 nm과 1550 nm 파장

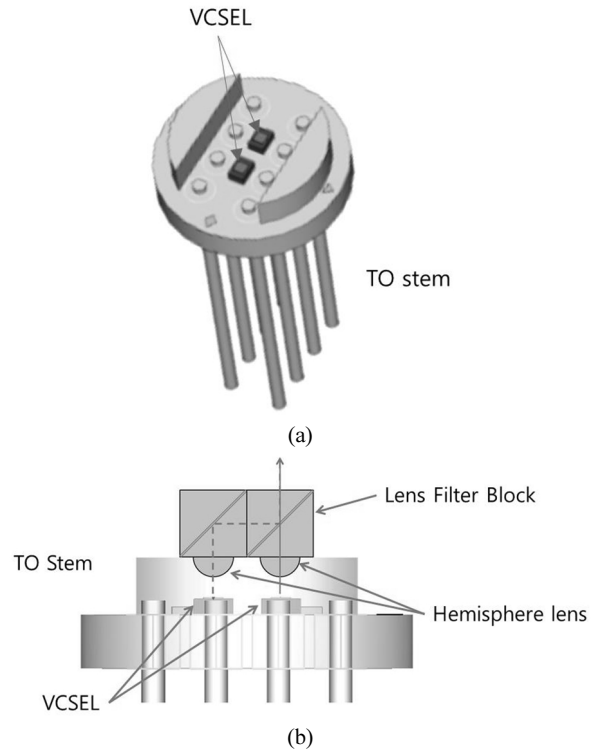


FIG. 1. The proposed integrated two-channel optical TO-package which has two VCSELs attached in parallel on an 8 pin TO-CAN package and on top of that the lens filter block (1 mm (H) × 2 mm (W) × 4 mm (D)) composed of hemisphere lenses and WDM filters is located.

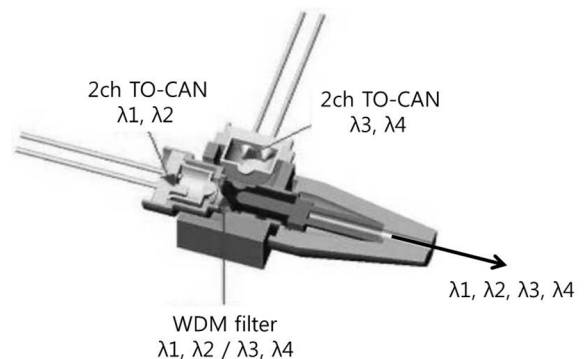


FIG. 2. An example of the four-channel optical transmitter structure for HDMI used conventional bidirectional packaging method which vertically interconnects two integrated two-channel TO-CAN packages with a 45 degrees angled WDM filter.

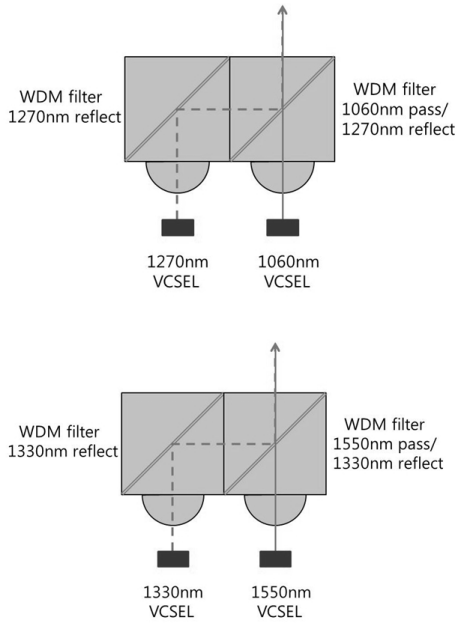


FIG. 3. The characteristics of the WDM filter in the lens filter block of the proposed integrated two-channel optical TO-package.

의 VCSEL을 사용하는 것으로 설계하였다. 이에 필요한 각 WDM 필터 특성은 Fig. 3과 같다. 이러한 집적형 2채널 TO 구조 광송신기는 TO-CAN 제작시 각 부품을 정확한 위치에 부착하기 위하여 Flip chip bonder를 사용하며 렌즈 필터 블록이 가시 광 영역에서 투명하기 때문에 VCSEL 위치에 맞추어 렌즈필터 블록을 정확히 정렬할 수 있다.

III. 집적형 2채널 TO 구조 광경로 설계

VCSEL과 렌즈필터 블록 사이의 거리를 설계하기 위하여 code V를 사용하여 크기가 1 mm × 1 mm × 1 mm 직육면체 구조에 지름이 각각 0.5 mm, 0.6 mm, 0.7 mm인 반구 렌즈를 부착한 렌즈필터의 초점거리(f_0)를 구하였다. 이때 렌즈 필터 블록을 통과하여 진행되는 빛은 지름이 0.5 mm인 평행한 Gaussian beam을 가정하였고 파장은 1060 nm, 1270 nm, 1330 nm, 1550 nm에 대하여 각각 시뮬레이션 하였다. VCSEL 데이터는 Raycan사의 RC52 (1060 nm), RC22 (1270 nm, 1330 nm), RC32 (1550 nm) 모델을 각각 적용하였다.

Figure 4는 각 파장에 따른 렌즈 필터의 초점거리 시뮬레이션 결과값을 나타낸 것이다. 지름이 0.5 mm인 반구 렌즈를 부착한 렌즈필터의 경우 파장이 780 nm에서 1550 nm까지 길어질수록 초점거리도 212 μm 에서 224 μm 까지 증가하였으며, 반구 렌즈 지름이 0.6 mm일 경우 1060 nm에서 1550 nm까지 파장이 길어질수록 초점거리도 351 μm 에서 359 μm 까지 증가하였고, 반구 렌즈 지름이 0.7 mm의 경우 1060 nm에서 1550 nm까지 파장이 길어질수록 초점거리가 427 μm 에서 436 μm 까지 증가하였다. 따라서 반구 렌즈 크기가 증가할수록 초점거리가 증가하는 것을 알 수 있으며 각각의 반구

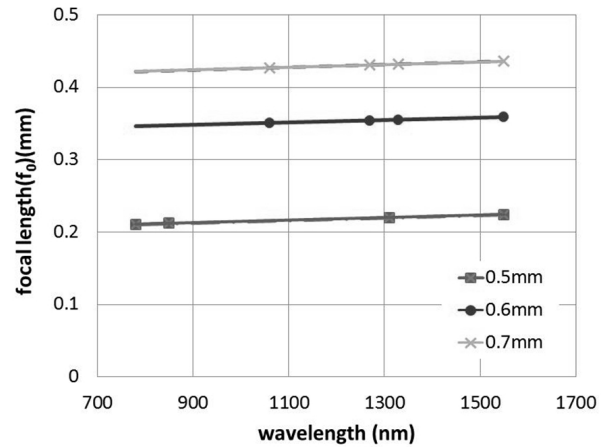


FIG. 4. The focal point (f) variations of the lens filter block depending on the wavelength of the incident Gaussian beam ($d = 0.5 \text{ mm}$) in case of 0.5 mm, 0.6 mm and 0.7 mm diameter of the hemisphere lens.

렌즈에서 파장에 따른 초점거리의 변화는 파장이 증가할수록 약간씩 증가하는 것을 알 수 있다.

위에서 계산한 초점거리(f_0)에 위치한 광원에서 방출된 빛이 렌즈 필터 블록과 지름 1.5 mm 볼 렌즈를 통과하는 광학계에 대하여 단일모드 광섬유가 위치할 빛의 초점 위치(F)와 광 결합효율을 조사하였다. 방출되는 빛이 렌즈필터 블록에서 반사하지 않고 볼 렌즈로 진행되는 1060 nm와 1550 nm 파장의 경우 (Fig. 5 (a))와 방출되는 빛이 렌즈필터 블록에서 2번 반사하여 볼 렌즈로 진행되는 1270 nm와 1330 nm 파장의 경우 (Fig. 5 (b))에 대하여 시뮬레이션 하였다. 이때 VCSEL에서 방출되는 빛의 방사각은 상용 제품의 데이터를 적용하여 1060 nm VCSEL의 경우 24°, 1270 nm, 1330 nm, 1550 nm VCSEL의 경우 17°로 설정하였으며 볼 렌즈와 렌즈 필터 간격(L)은 0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm로 변화시켜 조사하였다. 한편 반구 렌즈의 크기는 지름이 0.5 mm인 경우 초점거리(f_0)가 짧아 실제 집적형 2채널 TO 구조 광송신기 제작 시 광정렬에 어려움이 있어 지름이 0.6 mm와 0.7 mm인 경우로 한정하였다.

Figure 6는 반구 렌즈 지름이 0.6 mm인 경우 볼 렌즈와 렌즈 필터 간격에 따른 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 파장이 1060 nm인 경우 볼 렌즈와 렌즈 필터 간격이 0.5 mm에서 2.0 mm까지 증가할수록 초점 위치가 0.9 mm에서 0.578 mm로 감소하는 것을 알 수 있으며 파장이 1550 nm인 경우도 유사한 경향성을 보이며 초점 위치가 0.985 mm에서 0.659 mm로 감소하는 것을 알 수 있다. 1270 nm와 1330 nm 파장의 경우 두 곡선이 거의 일치하며 볼 렌즈와 렌즈 필터 간격이 0.5 mm에서 2.0 mm까지 증가할수록 초점 위치가 각각 0.761mm에서 0.598 mm와 0.762 mm에서 0.598 mm로 거의 동일하게 감소하는 것을 알 수 있다. 이 결과는 방출되는 빛이 렌즈필터 블록에서 반사하지 않고 볼 렌즈로 진행되는 경우 (1060 nm, 1550 nm 파장)와 방출되는 빛이 렌즈필터

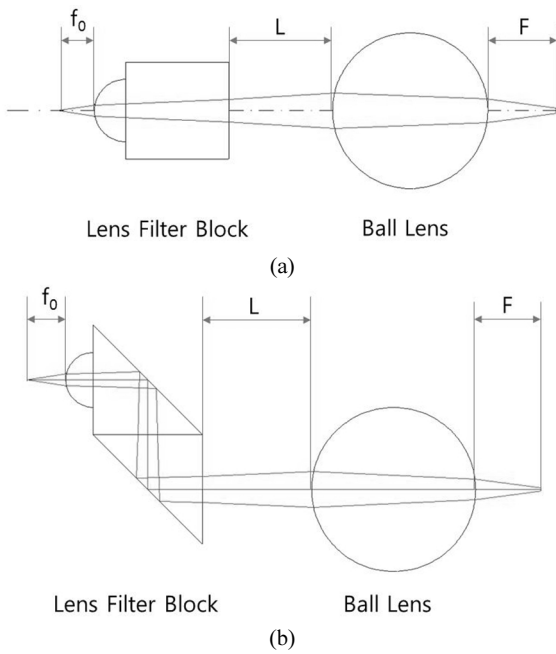


FIG. 5. Optical beam path of the integrated two-channel optical transmitter used in CODE V simulator for (a) the directly transmitted light in case of 1060 nm, 1550 nm wavelengths, (b) the double reflected light in case of 1270 nm, 1330 nm wavelengths.

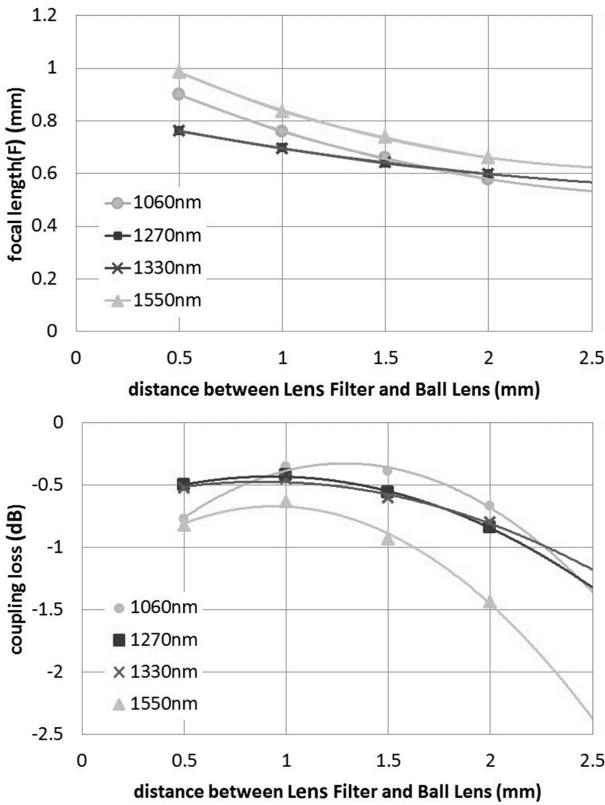


FIG. 6. The focal length (F) variations of the light passing through the lens filter block and 0.6 mm ball lens depending on the distance (L) between the lens filter block and the ball lens in case of 1060 nm, 1270 nm, 1330 nm and 1550 nm wavelengths of lights.

블록에서 2번 반사하여 볼 렌즈로 진행하는 경우 (1270 nm, 1330 nm 파장)의 광학계에서 빛의 진행 경로 차이에 의해 나타나는 현상에 기인한 것으로 생각된다. 광 결합 손실은 파장이 1060 nm인 경우 볼 렌즈와 렌즈필터 간격이 1.0 ~ 1.5 mm일 때 최소가 되어 0.4 dB 이하의 값을 갖고, 파장이 1550 nm인 경우 볼 렌즈와 렌즈필터 간격이 1.0 mm일 때 최소값인 0.63 dB를 나타낸다. 1270 nm과 1330 nm 파장의 경우 같은 경향성을 가지며 볼 렌즈와 렌즈필터 간격이 1.0 mm일 때 각각 0.42 dB, 0.45 dB의 최소값을 갖는 것을 알 수 있다. 4가지 파장 모두에 대하여 볼 렌즈와 렌즈필터 간격이 1.0 mm 부근에서 광 결합 손실이 최소가 되며 간격이 증가할수록 손실이 증가하는 것을 알 수 있으며 1550 nm 파장의 경우를 제외하고는 볼 렌즈와 렌즈필터 간격이 0.5 ~ 2 mm 사이에서 손실이 1 dB 이하인 것을 알 수 있다.

집적형 2채널 TO 구조 광송신기 제작 시 사용할 파장 조합을 고려하면 초점거리는 1060 nm와 1270 nm 조합의 경우 렌즈필터 블록과 볼 렌즈 사이 간격(L)이 1.7 mm일 때 F=0.62 mm에서 두 파장의 초점이 일치하는 것을 알 수 있었으며 1330 nm와 1550 nm 조합의 경우에는 렌즈필터 블록과 볼 렌즈 사이 간격(L)이 증가할수록 초점거리 차이가 60 μm이 내로 줄어들기는 하지만 일치하지는 않았다.

Figure 7은 반구 렌즈 지름이 0.7 mm인 경우 볼 렌즈와 렌

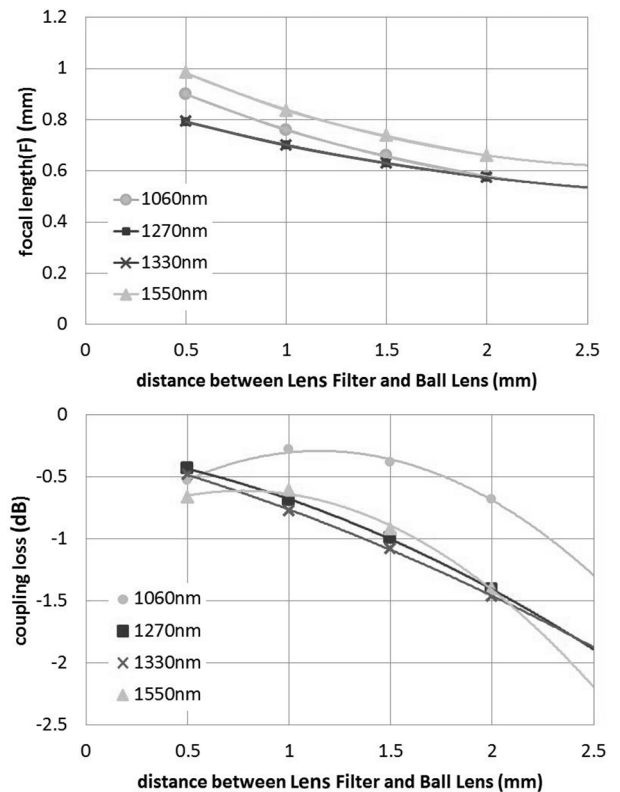


FIG. 7. The focal length (F) variations of the light passing through the lens filter block and 0.7 mm ball lens depending on the distance (L) between the lens filter block and the ball lens in case of 1060 nm, 1270 nm, 1330 nm and 1550 nm wavelengths.

TABLE 1. The summary of the optimum values of the diameter of the hemisphere lens, the distances (L) between the lens filter block and the ball lens, the focal length (f_0) of the lens filter blocks and the focal length (F) of the light passing through the lens filter block and the ball lens for 1060 nm/1270 nm and 1330 nm/1550 nm wavelength combinations

optical transmitter combination	hemisphere lens diameter	focal length of lens filter (f_0)	distances between lens filter block and ball lens (L)	focal length of ball lens (F)	coupling loss
1060 nm/1270 nm	0.6 mm	0.351 mm/ 0.354 mm	1.7 mm	0.62 mm	-0.44 dB/ -0.65 dB
	0.7 mm	0.427 mm/ 0.431 mm	2.0 mm	0.56 mm	-0.68 dB/ -1.41 dB
1330 nm/1550 nm	0.6 mm	0.355 mm/ 0.359 mm	2.0 mm	0.60~0.66 mm	≤ -0.89 dB / ≤ -1.44 dB
	0.7 mm	0.432 mm/ 0.436 mm	2.0 mm	0.55~0.63 mm	≤ -1.49 dB/ ≤ -1.40 dB

즈 필터 간격(L)에 따른 시뮬레이션 결과를 나타낸 것으로 초점 위치 변화는 반구 렌즈 지름이 0.6 mm인 경우와 같은 경향성을 갖는 것을 알 수 있다. 즉, 파장이 1060 nm인 경우 볼 렌즈와 렌즈 필터 간격이 0.5 mm에서 2.0 mm까지 증가할수록 초점 위치가 0.812 mm에서 0.554 mm로 감소하는 것을 알 수 있으며 파장이 1550 nm인 경우도 유사한 경향성을 보이며 초점 위치가 0.897 mm에서 0.632 mm로 감소하는 것을 알 수 있다. 1270 nm과 1330 nm 파장의 경우 두 곡선이 거의 일치하며 볼 렌즈와 렌즈 필터 간격이 0.5 mm에서 2.0 mm까지 증가할수록 초점 위치가 각각 0.741 m에서 0.558 mm과 0.744 mm에서 0.559 mm로 거의 동일하게 감소하는 것을 알 수 있다. 광 결합 손실은 파장이 1060 nm인 경우 볼 렌즈와 렌즈필터 간격이 1.0 mm일 때 최소가 되어 0.28 dB의 값을 갖고, 파장이 1550 nm인 경우 볼 렌즈와 렌즈필터 간격이 1.0 mm일 때 최소값인 0.61 dB를 나타내었다. 1270 nm과 1330 nm 파장의 경우 볼 렌즈와 렌즈필터 간격이 증가할수록 광 결합 손실이 증가하는 경향성을 가지며 볼 렌즈와 렌즈필터 간격이 0.5 mm일 때 각각 0.43 dB, 0.48 dB의 최소값을 갖는 것을 알 수 있다. 4가지 파장 모두에 대하여 볼 렌즈와 렌즈필터 간격이 0.5 ~ 1.0 mm 부근에서 광 결합 손실이 최소가 되며 간격이 증가할수록 반구 렌즈 지름이 0.6 mm인 경우 보다 손실이 크게 증가하는 것을 알 수 있다.

집적형 2채널 TO 구조 광송신기 제작 시 사용할 파장 조합을 고려하면 초점거리는 1060 nm와 1270 nm 조합의 경우 렌즈필터 블록과 볼 렌즈 사이 간격(L)이 2.0 mm일 때 $F=0.56$ mm에서 두 파장의 초점이 일치하는 것을 알 수 있었으며 1330 nm와 1550 nm 조합의 경우에는 렌즈필터 블록과 볼 렌즈 사이 간격(L)이 증가할수록 초점거리 차이가 70 μ m 이내로 줄어들기는 하지만 일치하지는 않았다. Table 1에 정리한 바와 같이 파장 1060 nm와 1270 nm 조합의 경우 반구 렌즈 지름이 0.6 mm인 경우가 0.7 mm인 경우에 비하여 초점이 일치하는 지점에서 광 결합 손실이 각각 -0.44 dB/-0.65 dB와 -0.68 dB/-1.41 dB로 더 작아 집적형 2채널 TO 구조 광송신기 제작 시 유리하다는 것을 알 수 있다. 이

때 VCSEL에서 반구 렌즈 사이의 간격(f_0)은 각각 0.351 mm, 0.354 mm이며, 볼 렌즈와 렌즈 필터 간격(L)은 1.7 mm, 볼 렌즈 뒷면에 형성되는 초점거리는 0.62 mm이다. 파장 1330 nm와 1550 nm 조합의 경우에도 초점이 근접하고 광 결합 손실이 크지 않은 $L=2.0$ mm를 기준으로 했을 때 반구 렌즈 지름이 0.6 mm인 경우가 0.7 mm인 경우에 비하여 광 결합 손실이 더 작아 집적형 2채널 TO 구조 광송신기 제작 시 유리하다는 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 광 HDMI 인터페이스에 적용하기 위한 집적형 2채널 TO 구조 광송신기를 제작하기 위하여 code V 시뮬레이터를 이용한 광학계 설계를 하였다. 파장에 따른 렌즈 필터의 초점거리(f_0)는 반구 렌즈 크기가 증가할수록 초점 거리가 증가하는 것을 알 수 있었으며 각각의 반구 렌즈에서 파장에 따른 초점거리의 변화는 파장이 증가할수록 약간씩 증가하는 것을 알 수 있었다. 한편 초점거리(f_0)에 광원이 위치할 경우 렌즈 필터 블록과 지름 1.5 mm 볼 렌즈를 통과한 빛의 초점 위치(F)는 볼 렌즈와 렌즈 필터 블록 간격(L)이 증가할수록 감소하였으며 광 결합 손실은 4가지 파장 모두에 대하여 볼 렌즈와 렌즈필터 간격이 0.5~1.5 mm 부근에서 -1 dB 이하의 값을 가지며 간격이 증가할수록 손실이 증가하는 것을 알 수 있었다.

집적형 2채널 TO 구조 광송신기 제작 시 1060 nm/1270 nm와 1330 nm/1550 nm로 두 개 파장씩 묶어 TO-CAN 형태로 제작하므로, 이들 파장 조합에서 렌즈필터 블록의 초점거리(f_0), 렌즈 필터 블록과 볼 렌즈를 통과한 빛의 초점 위치 (F)와 광 결합 손실을 고려했을 때 반구 렌즈의 지름은 0.6 mm, 볼 렌즈와 렌즈 필터 간격(L)은 파장 1060 nm/1270 nm 조합의 경우 1.7 mm, 파장 1330 nm/1550 nm 조합의 경우 2.0 mm일 때 최적의 결과를 얻을 수 있었다. 이때 렌즈필터 블록의 초점거리(f_0)는 1060 nm, 1270 nm, 1330 nm, 1550 nm 파장에 대하여 0.351 mm, 0.354 mm, 0.355 mm, 0.359 mm

이였으며 렌즈 필터 블록과 볼 렌즈를 통과한 빛의 초점 위치(F)는 파장 1060 nm/1270 nm 조합의 경우 0.62 mm, 파장 1330 nm/1550 nm 조합의 경우 0.60 mm ~ 0.66 mm이었다.

감사의 글

이 연구는 2015년도 광주대학교 대학 연구비의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

1. "Introducing HDMI Specification Version 1.4a," http://www.hdmi.org/manufacturers/hdmi_1_4.aspx
2. H.-J. Yoon and K.-N. Jun, "Compact bidirectional optical module using ceramic blocks," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16**, 1954-1956 (2004).
3. N. Schleppe, M. Nishigaki, H. Uemura, H. Furuyama, Y. Sugizaki, H. Shibata, and Y. Koike, "Optoelectronic high-speed HDMI cable with compact optical sub-assembly and 4 - 3.4 Gbit/s plastic optical fibre link," *Electron. Lett.* **48**, 1611-1613 (2012).
4. Z. Luo, Z. Zhu, and H. Zhang, "HDMI optical extender based on parallel optical transmitter and receiver," in *Proc. Photonics and Optoelectronics Meetings (POEM) 2009: Fiber Optic Communication and Sensors* (Wuhan, China, 2009), 75141H.
5. S.-C. Liu, R. R. Liu, W.-P. Chen, C. Z. Wu, and J.-S. Pan, "Optical sub-assembly solution for single fiber optical HDMI connector," *Proc. Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XIII*, 722906 (2009).
6. Y. Kuhara, Y. Fujimura, H. Nakanishi, Y. Iguchi, H. Terauchi, and N. Yamabayashi, "A coaxial-type 1.3/1.55 μm WDM-PD module for optical access networks," *IEEE J. Lightwave Technol.* **14**, 2374-2381 (1996).