

효율적인 라인램프를 위한 발광다이오드-광섬유 결합기의 설계 및 해석

홍대운¹ · 윤명중¹ · 김경호¹ · 유재근² · 이성재^{1†}

¹충남대학교 전자전파정보통신공학과 광과전자공학연구소
 ① 305-764 대전광역시 유성구 대학로 79

²한국표준과학연구원 기반표준본부 온도광도센터
 ② 305-340 대전광역시 유성구 가정로 209

(2009년 12월 1일 받음, 2010년 2월 2일 수정본 받음, 2010년 2월 2일 게재 확정)

플라스틱 광섬유의 주기적인 bending을 이용한 누설광섬유에 기반을 둔 라인램프를 제안하고, 그 핵심요소로서 높은 광결합 효율을 갖는 LED-광섬유 결합기를 설계 및 해석하였다. Monte Carlo photon simulation 기법을 이용하여 해석한 결과, 결합기의 광결합효율은 반사컵 옆면의 기울기각 θ_w 와 반사컵의 반사도 ρ_{ref} 에 대해 상대적으로 민감하게 영향을 받는 사실을 확인할 수 있었다. 광결합효율은 $\theta_w=60^\circ$ 근처에서 최대가 되었는데, 이 값은 일반적인 LED 램프에서 흔히 사용하는 반사컵 옆면의 기울기각 $\theta_w=45^\circ$ 보다 상당히 큰 값이다. 그리고 반사컵의 반사도 ρ_{ref} 가 0.8정도 이상이 되면, 광결합효율은 보통의 LD-광섬유 결합기에서 얻을 수 있는 광결합효율인 80% 정도를 뛰어 넘었다.

Design and Analysis of LED-Optical Fiber Coupler for Efficient Line Lamps

Dae-Woon Hong¹, Myeong-Jung Yoon¹, Kyung-Ho Kim¹, Jae-Keun Yoo², and Song-Jae Lee^{1†}

¹Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, 79 Daehangno, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea

²Division of Physical Metrology, Center for Temperature & Light Korea Research Institute of Standards and Science(KRISS)
 209 Gajeongno, Yuseong-gu, Daejeon 305-340, Korea

(Received December 1, 2009; Revised manuscript February 2, 2010; Accepted February 2, 2010)

Line lamps, which utilize leaky optical fibers based on periodic bending of plastic optical fibers, are proposed. The LED-optical fiber coupler, the key component of the line lamp, is designed and analyzed. The analysis by the Monte Carlo photon simulation method has shown that the optical coupling efficiency is affected rather sensitively by θ_w , the slanting angle of the reflecting cup sidewall and ρ_{ref} , the reflectivity of the reflecting cup. The optical coupling efficiency of the coupler reaches the maximum when θ_w is about 60° , which is significantly larger than $\theta_w=45^\circ$, the typical sidewall slanting angle of the reflecting cup adopted in most LED lamps. When the reflectivity of the reflecting cup is above 0.8, the optical coupling efficiency is larger than 80%, which is the typical efficiency to be achieved in LD-optical fiber coupler.

Keywords: Light-emitting diode, Plastic optical fiber, Leaky fiber, Optical coupling efficiency

OCIS codes: (230.3670) Light-emitting diodes; (230.6080) Sources

I. 서 론

현재 발광다이오드(light-emitting diode: LED)는 교통신호 등, 전광판 등에 국한되지 않고, 일반조명(general lighting) 분야에까지 확대되어 이용되기 시작했다. 하지만, 당분간 LED의 일반조명 분야에서의 이용은 주로 백열등을 점진적으로 대체해 가는 제한적인 방식일 것으로 여겨진다. 지금까지의

LED는 효율이 백열등을 능가한다고 하지만, 예를 들어 형광등과 같은 gas-discharge 현상에 바탕을 두고 있는 램프와 비교할 때 효율 관점에서 큰 이점이 없는 것으로 알려지고 있다. 따라서, 형광등에 비하여 가격 경쟁력이 크게 뒤지는 LED가 본격적으로 일반조명 분야에서 활용되기 위해서는 발광효율이 획기적으로 개선된 새로운 LED 칩 재료나 구조가 개발되는 등의 돌파구가 마련되어야 할 것으로 판단된다.

[†]E-mail: sjlee@cnu.ac.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

하지만, 이러한 기술적 돌파구와 상관없이, 앞으로 LED의 시장이 더욱 확대될 것으로 기대되는 이유는 기존의 LED 시장이 더 성장됨과 아울러 장식조명 분야에서 LED의 응용이 급속히 확대되고 있는 것이다. 일반적으로 색상의 순도가 높을수록 눈에 잘 띄이며 장식성도 뛰어난 만큼^[1], 필터 없이도 상대적으로 순도가 높은 색광을 얻을 수 있는 LED는 장식조명 분야에서의 잠재력이 매우 크다.

장식조명을 위한 램프는 주로 건물이나 물건의 테두리를 따라 설치되는 것이 보통 이어서 일반적으로 라인 형태를 하고 있는 것이 바람직하다. 현재 LED를 기반으로 하는 라인 형태의 램프는 주로 플라스틱 튜브 안에 복수의 개별 LED들을 일정한 간격으로 배열하는 방식으로 제작되고 있다. 하지만, 이와 같은 방식의 라인램프는 밝게 빛나는 점들이 연속적으로 이어지지 못하고 서로 분리됨으로써 완전한 의미의 라인램프라고는 할 수 없다.

본 논문에서는 발광다이오드와 누설 플라스틱 광섬유가 결합된 새로운 형태의 라인램프를 제안하고, 그 제안된 램프의 핵심 요소인 높은 광결합효율(optical coupling efficiency)을 갖는 발광다이오드-광섬유 결합기의 구조 및 해석에 대하여 다룬다. 누설광섬유는 결합된 광이 도파되는 과정에서 점진적으로 광섬유의 외벽을 따라 밖으로 새어나가는 특성을 갖는다. 이와 같은 누설광섬유를 이용할 경우 밝은 점들이 연속적으로 이어지는 라인램프를 제작할 수 있다. 뿐만 아니라 이 논문으로부터 제안된 라인램프는 플라스틱 광섬유 특유의 유연성을 가지고 있어서 라인램프의 layout을 설치 현장에 맞추어 손쉽게 바꿀 수 있다는 장점도 갖는다.

II. 플라스틱 누설광섬유

누설광섬유를 제작하기 위한 방법에는 여러 가지가 있다. 예를 들어, 산란 특성을 갖는 물질을 광섬유의 core에 첨가하게 되면 광섬유로 결합된 광이 도파되는 과정에서 광섬유의 외벽을 통하여 점진적으로 빠져 나오게 된다^[2]. 또 다른 방법은 광섬유의 외벽에 적절한 깊이를 갖는 홈집을 연속적 또는 주기적으로 만들어 주는 것인데, 이 경우 도파 모드가 홈집에 의해 교란되면서 도파광의 일부가 외벽을 따라 빠져 나오게 된다. 한편, 플라스틱 광섬유와 같이 유연성이 뛰어난 경우에는, bending loss 개념을 이용해서도 누설광섬유를 얻을 수 있는데^[3], 그 개념은 그림 1에 보인 바와 같다.

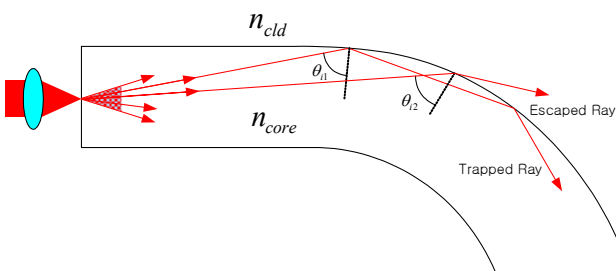


FIG. 1. Bending loss in optical fiber.

일반적으로, 플라스틱 광섬유는 광통신에 이용되고 있는 광섬유와는 달리, core의 직경이 광섬유 전체 직경의 90% 정도를 차지하며 core와 cladding의 굴절률 차이도 거의 없다. 이와 같은 플라스틱 광섬유는, 특히 신호 전송 관점이 아닌 도파광의 누설 관점만을 고려할 경우, 그림 1에 보인 바와 같이 굴절률 n_{core} 을 갖는 막대형 core가 굴절률 $n_{cld}=1$ 을 갖는 공기(air)의 cladding 속에 파묻혀 있는 구조로 단순화하여 생각할 수 있다.

이와 같은 구조의 플라스틱 광섬유를 일정한 곡률로 굽혀 주면(bending) core-cladding 경계면에서의 빛의 입사각 θ_i 가 임계각 θ_{ic}

$$\theta_{ic} = \sin^{-1}\left(\frac{n_{cld}}{n_{core}}\right) \quad (1)$$

보다 작게 주어지는 ray들이 나타나게 되는데, 이와 같은 ray는 경계면에서 전반사(total internal reflection)되지 못함으로써 밖으로 빠져나갈 확률을 갖는다. 이와 같이 밖으로 빠져나가는 ray들은 광섬유의 bending 곡률이 증가할수록 늘어나기 때문에 도파광의 누설되는 정도는 광섬유의 bending 곡률에 비례하여 증가하게 된다. 보통 PMMA (poly methyl methacrylate) 같은 재질로 이루어진 플라스틱 광섬유의 경우, 매우 큰 곡률로 bending 시키더라도 광섬유가 쉽게 절단되지 않기 때문에, 광섬유의 bending 곡률을 상당히 넓은 범위에서 변화시켜줌으로써 누설되는 정도를 손쉽게 조절할 수 있다. 이와 같이 단순히 플라스틱 광섬유의 bending 곡률만을 변화시켜 누설 계수를 조절할 수 있는 특징은 scattering 특성의 core를 활용하는 누설광섬유에서는 찾을 수 없는 큰 장점이라고 할 수 있다.

그림 2는 광섬유를 bending 시키는 몇 가지 방법들을 보여 주고 있다. 그림 2(a)는 광섬유를 평면상에서 정현파 형태로 bending시킨 경우인데, 광섬유의 곡률이 길이 방향에 대하여 일정하지 않음에 따라 광이 누설되는 정도와 밝기가 길이 방향에 대하여 변하는 문제가 있다. 이에 비하여 그림 2(b)는 광섬유를 지지용 막대를 따라 나선형으로 감는 방식으로 부

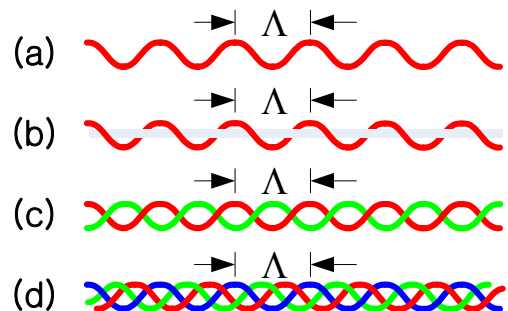


FIG. 2. Various bending methods of optical fiber: (a) Sinusoidal, (b) Spiral, (c) Two-fiber, (d) Three-fiber.

피는 증가하지만 길이 방향에 대한 광섬유의 곡률을 일정하게 유지할 수 있어서 길이 방향에 대한 라인램프 밝기의 uniformity가 크게 개선된다. 그림 2(c)는 2개의 광섬유를 이용하여 새끼 꼬듯이 하나의 광섬유를 또 다른 광섬유 위에서 서로 감아 놓은 경우를 보여주고 있는데, 이들 두 개의 광섬유에 서로 다른 광원을 결합시켜 독립적으로 구동할 경우, 보다 더 다양한 색상을 구현할 수 있게 된다. 그림 2(d)는 3개의 광섬유를 이용하여 마치 머리 땅듯이, 서로 다른 광섬유 위에 감아 놓은 경우를 보여주고 있는데, 이들 3개의 광섬유에 3원색 광원을 이용하여 서로 독립적으로 구동할 경우, full-color의 구현도 가능하게 된다.

III. LED-광섬유 결합기

3.1. 결합기의 기본 구조

플라스틱 누설광섬유에 바탕을 둔 라인램프가 실용성을 갖기 위해서는 광원으로부터 발생된 빛을 효율적으로 광섬유에 결합시켜 줄 수 있는 결합기(coupler)가 필수적으로 요구된다. 일반적으로, 플라스틱 광섬유의 유연성은 광섬유의 직경이 증가할수록 급격히 떨어지기 때문에, bending기법에 기반을 둔 라인램프를 제작하기 위해서는 1~2 mm 정도의 상대적으로 작은 직경을 갖는 플라스틱 광섬유가 바람직하다. 이와 같이, 비교적 작은 직경을 갖는 플라스틱 광섬유에 결합시키기에 적합한 광원은, 먼저 광방출 개구면이 작아야 하며, 다음으로 빔 패턴(beam pattern)의 폭이 광섬유에 고유하게 주어지는 수광각(acceptance angle)의 범위를 크게 벗어나지 않아야만 한다.

이와 같은 조건을 잘 만족시킬 수 있는 광원으로는 우선 레이저다이오드(laser diode: LD)를 생각할 수 있다. LD의 경우 일반적으로 beam spot의 직경은 2~3 μm 정도로 매우 작고 단방향빔폭(single sided beam width)도 30° 정도 이하로 비교적 좁아서, 렌즈를 삽입하여 집속시킬 경우 상대적으로 큰 단면을 갖는 플라스틱 광섬유에 효율적으로 결합시킬 수 있다. 다만, LD 칩과 광섬유 사이에는 LD cap window와 렌즈 등이 개입될 수밖에 없어서, 무반사 코팅(anti-reflection coating)을 도입하지 않을 경우 Fresnel 반사현상이 여러 번에 걸쳐 일어나기 때문에, 얻을 수 있는 최대 광결합효율(optical coupling efficiency)은 약 80% 정도가 된다. 이와 같이 비교적 높은 광결합효율은 LD 광섬유 결합기의 큰 장점이라고 할 수 있지만, LD는 조명광원으로써 치명적인 단점들을 가지고 있다. 즉, 이제까지 상업적으로 개발된 LD의 색상이 크게 제한되어 있어서, LD를 광원으로 이용할 경우 다채로운 색상의 라인램프를 얻는 것이 불가능하다. 현재, 가시광 LD로는 적색과 청색 LD가 상업적으로 개발되어 있다고는 하지만, 특히 청색 LD의 경우 가격이 매우 높을 뿐만 아니라 중심파장도 좀 더 바람직한 460~470 nm 대역으로부터 벗어나 있는 문제점이 있다.

따라서, 본 논문에서는 대안으로 다양한 색상이 개발되어 있는 LED를 광원으로 사용하는 결합기를 목표로 하고 있는

데, 일반적으로 LED로부터 방출된 빛을 플라스틱 광섬유로 결합시킬 수 있는 가장 손쉬운 방법을 보이면 그림 3에 보인 바와 같다.

그림 3에 보인 LED-광섬유 결합기는 쉽게 구할 수 있는 리드(lead)형 LED에 플라스틱 광섬유를 외부적으로 결합시키는 방법을 이용하고 있다. 그런데, 리드형 램프의 경우 dome lens의 직경은 보통 3~10 mm 정도로써 사용하고자는 플라스틱 광섬유의 직경보다 클 뿐만 아니라 일반적으로 빔폭도 매우 넓다. 그 결과 LED 램프 외부에 집속용 렌즈를 삽입하더라도 얻을 수 있는 광결합효율은 크게 제한될 수밖에 없다. 보통의 단위 LED 램프로부터 얻을 수 있는 광출력이 수십 mW 이하로 제한되어 있다는 점을 감안한다면, 이와 같이 낮은 광결합효율은 라인램프의 효율성을 크게 떨어뜨리게 된다.

그림 4는 본 논문에서 제안하고 있는 새로운 형태의 LED-광섬유 결합기의 구조를 보여주고 있는데, 가장 중요한 특징은 광섬유를 이미 패키징된 램프에 외부적으로 결합시키는 대신에, LED 램프의 패키징 공정 중에 광섬유를 일체형으로 결합시킨다는 점이다. 제안된 결합기를 제작하기 위해서는, 먼저 방열 특성이 우수한 MCPCB(metal core printed circuit board)와 같은 기판 위에 LED 칩을 부착한 다음, 칩의 두 전극을 각각의 bonding pad에 bond wire로 연결한다. 다음으로

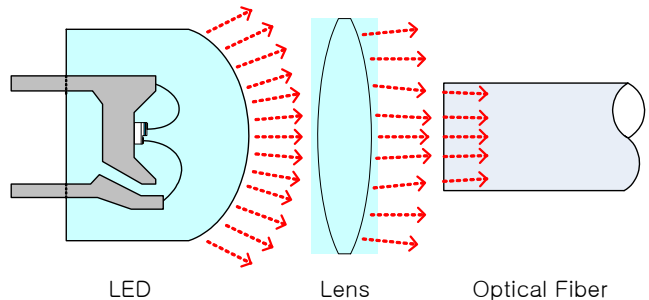


FIG. 3. External coupling of LED lamp and optical fiber by using lens.

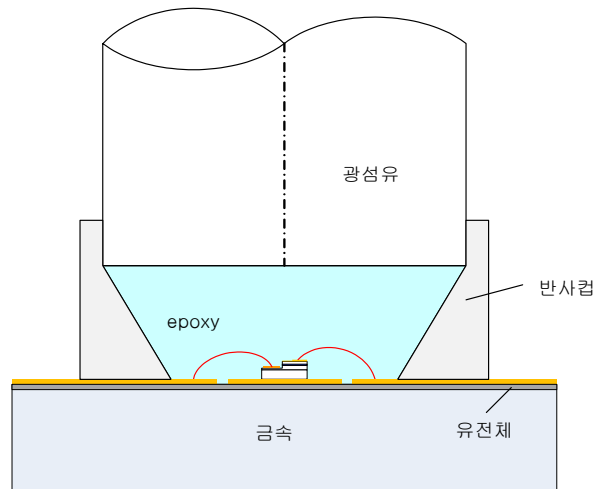


FIG. 4. Structure of the proposed LED-optical fiber coupler.

내벽이 반사도가 높은 물질로 도금 또는 도포되어 있는 반사컵을 부착시킨다. 그리고, 반사컵의 내부에 에폭시(epoxy)나 실리콘 수지와 같은 밀봉재(encapsulant)를 주입한 다음 플라스틱 광섬유를 반사컵의 상부에 일체형으로 몰딩(molding)시킨다.

제안된 결합기에서는 bond wire를 포함한 LED 칩 전체가 반사컵의 하부에 완전히 수용되기 때문에 반사컵에 bond wire를 통과시키기 위한 별도의 구멍이 필요 없게 되며^[4], 광섬유가 반사컵의 상부 개구 단면에 빈틈없이 삽입됨으로써, LED로부터 방출된 광자들이 밖으로 빠져나갈 여지가 없게 된다. 그리고, LED 칩과 광섬유 사이에는 광섬유와 굴절률차가 거의 없는 밀봉재로 채워져 있어서, LED 칩으로부터 방출된 광자들은 밀봉재와 광섬유의 경계면에서 거의 반사되지 않고, 대부분 광섬유 내부로 투과되기 때문에 광결합효율이 획기적으로 개선된다.

제안된 결합기의 가능성을 타진하기 위한 방안으로, 그림 5에 보인 바와 같이, 리드형 LED 램프에 비하여, 플라스틱 광섬유의 단면과 훨씬 더 compatible한 구조를 하고 있는 SMD(surface mounted devices)형 LED 램프에 플라스틱 광섬유를 외부적으로 결합시키는 방법을 이용하여 prototype 결합기를 제작하였다.

하지만, 제작된 prototype 결합기의 경우, 광섬유 단면의 직경과 SMD형 LED 램프 개구면의 직경이 상당히 차이가 나는 문제로 인하여 LED로부터 방출된 광자의 상당한 비율이 광섬유 외부로 빠져나가는 현상을 피할 수 없었다. 또한, SMD형 LED에서 반사컵으로 사용하고 있는 PPA(polyphthalamide) 재질은 반사도가 별로 높지 않아서 LED 칩으로부터 직접 입사하는 광자나 주기적으로 bending된 누설광섬유로부터 Rayleigh scattering에 의해 되돌아오는 광자들의 상당한 비율이 반사되지 못하고 결국은 손실로 나타나는 문제도 피할 수 없었

다. 이와 같은 문제들에도 불구하고 이 결합기를 이용하여 어느 정도 밝은 prototype 라인램프를 만들 수 있었는데, 그 한 예를 보이면 그림 6에 보인 바와 같다.

3.2. 결합기의 해석 및 Simulation

제안된 LED-광섬유 결합기의 핵심요소는 반사컵이라고 할 수 있다. 반사컵의 바람직한 형태로는 그림 7에 보인 바와 같은 밑이 잘린 원추(cone)를 생각할 수 있는데, 이와 같은 원추는 아래

$$x^2 + y^2 = (r_o + z / \tan(\theta_w)) \quad (0 < z < h) \quad (2)$$

와 같이 상부 방향 즉, z-축 방향에 대하여 반경이 선형적으로 증가하는 원으로 나타낼 수 있다. 위 식에서 r_o , θ_w , h 는 반사컵의 모양을 결정하는 3개의 변수로서 각각 하부 단면의 반경, 옆면의 기울기각, 높이를 나타낸다.

이들 3개의 변수 중 반사컵 하부 단면의 반경 r_o 는 비교적 쉽게 결정할 수 있다. 즉, 가는 굵기의 광섬유도 사용 가능하도록 하기 위해서, r_o 는 반사컵 안에 bond wire를 포함한 LED 칩이 완전히 수용될 수 있는 범위에서 가장 작은 값으로 결정하는 하는 것이 유리하다. 한편, r_o 가 감소할수록 반사컵 옆면으로부터의 반사를 거쳐 위쪽으로 향하게 되는 광자들의 비율이 증가함으로써 광결합효율이 개선되는 이점도 나타나게 된다. 고휘도 LED의 경우, 칩의 면적은 보통 $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$ 정도 이하이기 때문에 반사컵 하부 단면의 직경 $2r_o$ 는 1 mm 정도로 선택할 수 있다.

반사컵의 높이 h 도 사용 가능한 광섬유의 굵기와 직접적인 관련을 갖는다. 즉, 일반적으로 h 가 증가할수록 반사컵의 옆면으로부터 반사되어 위쪽으로 향하는 광자들의 비율이 증가함으로써 광결합효율이 증가하는 이점이 있지만, 반사컵 상부 단면의 반경이 그만큼 증가함으로써 가는 굵기의 광섬유를 사용할 수 없게 된다. 보통의 LED 칩의 두께가 0.1 mm

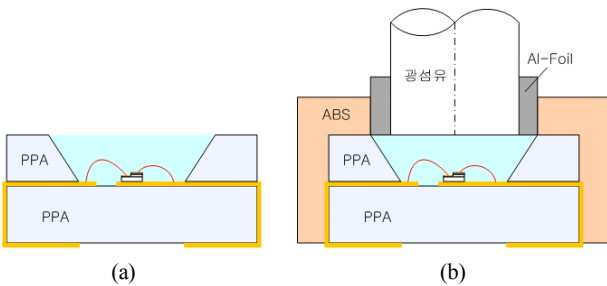


FIG. 5. (a) 3258-SMD LED lamp, (b) External coupling of SMD lamp and optical fiber.

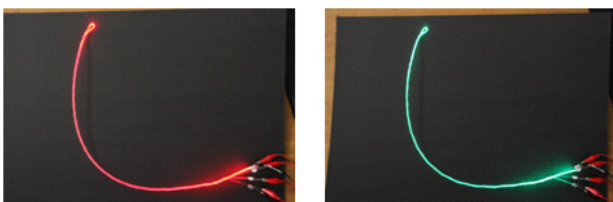


FIG. 6. Prototype line lamp: (a) driven in red, (b) driven in green.

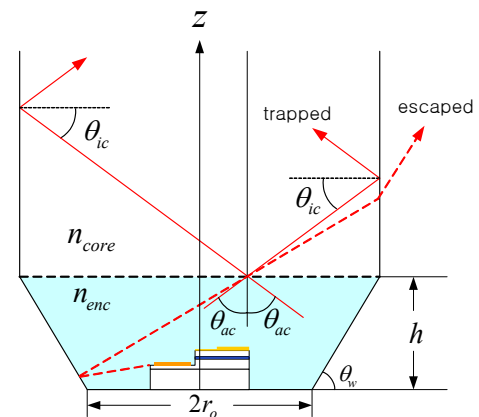


FIG. 7. Reflecting cup in the shape of a cone and the photon acceptance angle.

이하이며, bond wire 높이가 0.5 mm 정도 이하라고 한다면, 반사컵의 높이 h 는 0.5~1 mm 범위에서 선택할 수 있다.

반사컵 옆면의 기울기각 θ_w 는 옆면으로 입사되어 반사하는 광자들의 진행 방향과 직결되어 있기 때문에, 광결합효율에 민감하게 영향을 미치게 되는데, 먼저 광섬유에 고유하게 주어지는 수광각에 대하여 살펴볼 필요가 있다. 일반적으로 LED 칩과 광섬유 사이에 채워지는 에폭시나 실리콘 수지 등과 같은 밀봉재의 굴절률 n_{enc} 는 약 1.5 정도로 PMMA와 같은 플라스틱 광섬유의 core 굴절률 n_{core} 와 거의 차이가 없다. 이 경우 밀봉재-광섬유 경계면으로 입사하는 광자들은 그림 7에 보인 바와 같이 그 계면에서 굴절됨이 없이 100% 가까이 광섬유 안으로 투과해 들어가게 된다. 이와 같이 광섬유로 안으로 진출한 광자들은, 광섬유 벽면에서의 입사각 θ_i 가 식 (1)에 의해 주어지는 광섬유 벽면에서의 임계각 θ_{ic} 보다 큰 경우, 광섬유를 따라 도파된다. 그리고 입사각 θ_i 가 임계각 θ_{ic} 보다 작은 경우에는 전반사 조건을 만족시키지 못함에 따라 결국에는 광섬유 밖으로 빠져나가게 된다.

이상의 개념을 바탕으로, 광섬유 안으로 투과한 광자들이 연속적인 전반사를 거치면서 도파되기 위해서는 밀봉재-광섬유 계면에서의 입사각 θ_i 가 수광각 θ_{ac}

$$\theta_{ac} = \frac{\pi}{2} - \theta_{ic} = \frac{\pi}{2} - \sin^{-1}\left(\frac{n_{cld}}{n_{core}}\right) \cong 48^\circ \quad (3)$$

보다 작아야 한다는 조건을 이끌어낼 수 있다. 보통 식 (3)의 θ_{ac} 를 단방향수광각(single sided acceptance angle)으로 부르는데, 반대 방향에서 입사한 광자들에 대해서도 동일한 조건이 적용되기 때문에 실질적인 의미에서의 수광각은 양방향수광각(double sided acceptance angle) $2\theta_{ac}$ 라고 할 수 있다. 양방향수광각 $2\theta_{ac}$ 는 약 96° 정도로 매우 높게 주어지는데, 이와 같이 큰 값의 수광각은 곧바로 높은 광결합효율을 얻을 수 있게 하는 근본 원인이 된다고 할 수 있다.

반사컵의 변수에는 r_o , θ_w , h 등과 같은 반사컵의 모양을 결정하는 변수 외에 또 하나의 중요한 변수로서 반사컵 표면의 반사도 ρ_{ref} 가 있다. LED 칩으로부터 방출된 광자들 중 상당한 비율이 반사컵의 밑면 또는 옆면으로부터 반사를 거쳐 광섬유로 입사되게 된다. 뿐만 아니라, 특히 광섬유의 주기적인 bending을 이용하는 누설광섬유의 경우에는, 광섬유로 결합된 광자들까지도 심각한 Rayleigh scattering 현상으로 말미암아 상당한 비율이 LED 쪽으로 되돌아오게 된다. 따라서 결합기에서의 광손실을 획기적으로 줄이기 위해서는, 반사컵 표면을 향하여 직접 또는 되돌아와 입사하는 광자들의 대부분을 반사시킬 수 있도록 반사컵의 표면이 높은 반사도 ρ_{ref} 를 갖는 물질로 도포되는 것이 매우 중요하다.

제한된 결합기의 해석에는 그 동안 LED 칩 및 package 구조 해석을 위해 많이 사용된 바 있는 Monte Carlo photon simulation 기법이 사용되었다^[5,6]. 이 기법에서는 먼저 충분

히 많은 수의 광자들을 LED 칩의 활성층 전 영역에 걸쳐, 대략의 전류밀도에 비례하는 밀도로, 분포시켜 발생시킨다. 다음으로 발생된 각각의 광자들이 칩 내에서의 구체적인 궤적을, 매질 내에서의 흡수 및 다양한 계면에서의 반사/투과 현상을 난수(random number)에 의해 모사하는 방법을 이용하여 추적하게 된다. 그리고 이와 같은 과정을 거쳐 칩의 전 표면으로부터 빠져 나온 광자들에 대해서는, 또다시 비슷한 방법을 이용하여, 밀봉재가 채워진 반사컵 내에서의 궤적을 추적한다. 이들 광자들 중에 일부는 반사컵 표면에서 흡수되고 나머지는 모두 광섬유 안으로 투과된다. 그리고 투과된 광자들의 일부는 광섬유 벽면에서 전반사 조건을 만족하지 못하고 결국 광섬유 밖으로 빠져나가게 되며, 그 나머지만이 도파모드로 살아남게 된다. LED 칩 밖으로 탈출한 전체 광자들 중에서 도파모드로 살아남은 광자들의 비율이 광결합효율이 된다.

그림 8~10은 각각 반사컵의 높이 h , 반사컵 옆면의 기울기각 θ_w , 반사컵의 반사도 ρ_{ref} 에 따른 광결합효율의 변화를

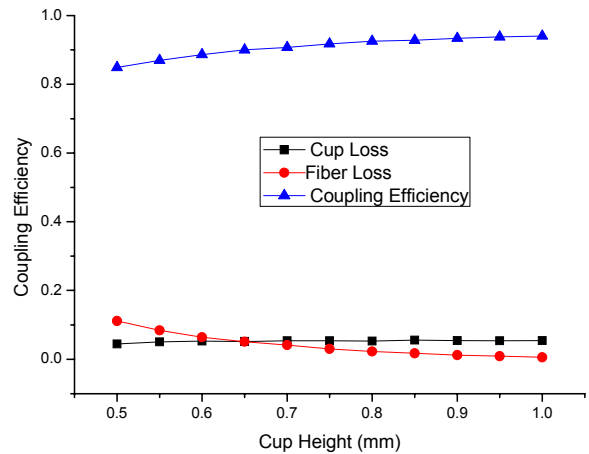


FIG. 8. Optical coupling efficiency as a function of the reflecting cup height h . ($2r_o = 1mm, \theta_w = 60^\circ, \rho_{ref} = 0.95$)

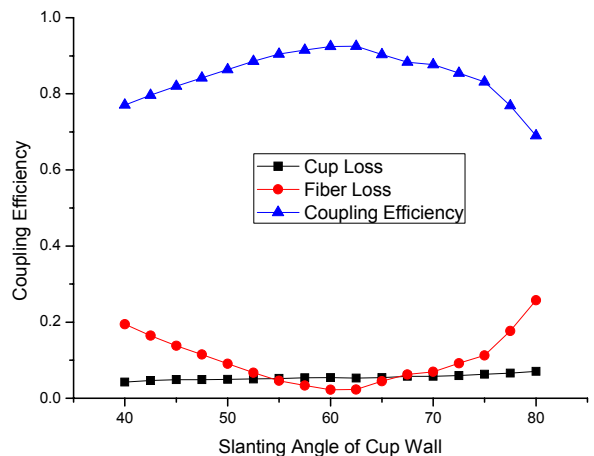


FIG. 9. Optical coupling efficiency as a function of the slanting angle of the reflecting cup side wall θ_w . ($2r_o = 1mm, h = 8mm, \rho_{ref} = 0.95$)

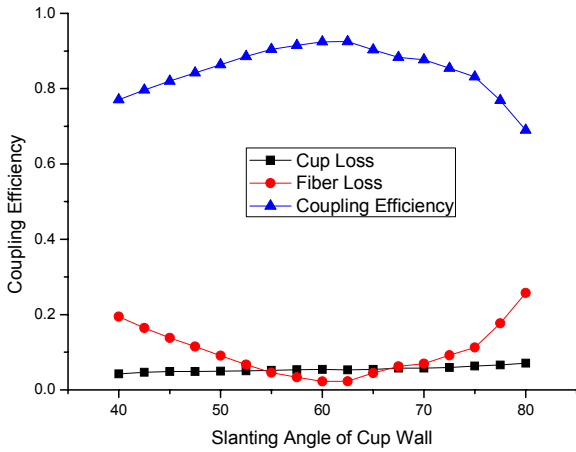


FIG. 10. Optical coupling efficiency as a function of the reflectivity of the reflecting cup ρ_{ref} . ($2r_o = 1mm, \theta_w = 60^\circ, h = 0.8mm$)

보여주고 있다.

먼저 반사컵의 높이 h 가 증가하게 되면, 반사컵의 옆면을 거쳐 광섬유로 입사하는 광자들 중에 그 입사각이 수광각 θ_{ac} 보다 작은 값을 갖는 광자들의 비율이 증가함으로써 광결합효율이 개선된다. 이를 달리 표현하면, h 가 감소할수록 반사컵의 옆면을 거치지 않고 직접 광섬유로 입사하는 광자들의 비율이 증가하게 되는데, 이들 광자들의 상당한 비율이 광섬유에 대한 입사각이 수광각 θ_{ac} 의 범위를 벗어나게 되어 광섬유 밖으로 탈출하게 된다. 이와 같이 광섬유 안으로 진출한 후, 그림 7에 보인 바와 같이, 광섬유 밖으로 탈출하게 되는 광자들에 의해 기인되는 손실을 광섬유손실(fiber loss)로 정의하였다. 그리고 반사컵의 표면에 입사한 후 반사되지 못하고 흡수되는 광자들에 의한 손실을 반사컵손실(cup loss)로 정의하였다. 일반적으로 반사컵의 높이 h 가 증가할수록 반사컵을 거쳐 광섬유로 입사하는 광자들의 비율이 증가하게 되어 반사컵손실은 증가하게 되지만, 그림 8의 경우에서 처럼 비교적 높은 반사도 $\rho_{ref}=0.95$ 를 가정한 경우에는, 반사컵의 높이 h 에 따른 반사컵손실에 대한 영향은 상대적으로 미미하게 된다.

반사컵 옆면의 기울기각 θ_w 는 반사컵 옆면을 거쳐 광섬유로 입사하는 광자들의 진행방향을 직접적으로 결정하기 때문에 광결합효율에 민감하게 영향을 미치게 된다. 일반적으로 반사컵 옆면의 기울기각 θ_w 가 증가할수록, 광섬유에 대한 입사각이 수광각 θ_{ac} 범위 안으로 들어오는 광자들의 비율이 증가함으로써, 광섬유손실은 감소하게 되고 광결합효율은 개선된다. 하지만 옆면의 기울기각 θ_w 가 너무 증가하게 되면, LED로부터 수평방향에 가깝게 방출된 광자들의 경우 반사컵을 거쳐 반사하더라도 광섬유에 대한 입사각이 수광각 θ_{ac} 을 벗어나는 광자들이 많아지기 때문에 광섬유손실이 증가하게 되고 광결합효율은 떨어지게 된다. 따라서 이상과 같은 반사컵 옆면의 기울기각 θ_w 의 광결합효율에 미치는 두 가지의 상반된 영향으로 말미암아, 광결합효율이 최대가 되는

θ_w 가 존재하게 된다. 제안된 결합기의 경우 $\theta_w=60^\circ$ 정도에서 최대 광결합효율을 얻을 수 있었는데, 이와 같이 최적의 반사컵 옆면의 기울기각이 보통의 LED 램프에서 흔히 사용하는 옆면의 기울기각 $\theta_w=45^\circ$ 보다 상당히 크게 주어진다 것은 특기할 만한 점이다.

일반적으로 반사컵의 반사도 ρ_{ref} 는 반사컵손실에 매우 민감한 영향을 미치게 된다. 즉, 반사도 ρ_{ref} 가 감소하게 되면 반사컵으로 입사한 후 반사되지 못하고 흡수되는 광자들의 비율이 증가함으로써 반사컵손실이 급격히 증가하게 되고 광결합효율은 급격히 떨어지게 된다. 이에 비해, 광섬유손실은 광자들의 진행방향에만 주로 관련을 갖기 때문에 반사도 ρ_{ref} 의 영향을 거의 받지 않는다. 이와 같이 반사컵의 반사도 ρ_{ref} 가 감소할수록 광결합효율이 급격히 떨어지기 때문에 광결합효율을 높이기 위해서는 높은 반사도 ρ_{ref} 를 갖는 반사컵이 필수적으로 요구된다고 할 수 있다. 그림 10으로부터 얻을 수 있는 중요한 결론의 하나는 반사컵의 반사도 ρ_{ref} 가 0.8 정도 이상이 되면, 얻을 수 있는 광결합효율은 보통의 LD-광섬유 결합기에서 예상되는 80% 정도를 넘는다는 점이다.

IV. 결 론

플라스틱 광섬유의 주기적인 bending을 이용한 누설광섬유에 기반을 둔 새로운 형태의 라인램프를 제안하고, 그 핵심요소로서 LED-광섬유 결합기의 구조를 설계하고 해석하였다. 제안된 LED-광섬유 결합기에서는 광섬유를, 이미 패키징된 LED 램프에 외부적으로 결합하는 대신에, LED 칩 패키징 과정 중에 LED 칩에 근접하여 일체형으로 결합시킨다. 그리고 LED 칩과 광섬유 사이의 반사컵의 빈 공간은 굴절률이 플라스틱 광섬유와 비슷한 값을 갖는 에폭시나 실리콘 수지 등으로 채워진다.

제안된 결합기의 핵심요소는 반사컵이라고 할 수 있는데, 반사컵의 구조 변수 중에서 특히, 반사컵 옆면의 기울기각 θ_w 가 광결합효율에 상대적으로 민감하게 영향을 미치게 된다. 특기할만한 점은 일반적인 LED 램프에서 보통 사용하는 반사컵 옆면의 기울기각 $\theta_w=45^\circ$ 보다 상당히 큰 $\theta_w=60^\circ$ 에서 최대 광결합효율이 얻어진다는 점이다. 반사컵의 또 하나의 중요한 변수로 반사컵의 반사도 ρ_{ref} 을 들 수 있는데, ρ_{ref} 가 감소하게 되면 반사컵손실이 급격히 증가하면서 광결합효율은 급격히 떨어지게 된다. 따라서 높은 반사도를 갖는 반사컵이 필수적으로 요구된다고 할 수 있는데, 주목할 점은 반사컵의 반사도 ρ_{ref} 가 0.8 정도를 넘게 되면 얻을 수 있는 광결합효율은 보통의 LD-광섬유 결합기에서 예상되는 광결합효율 80% 정도를 넘는다는 점이다.

본 논문에서 제안된 라인램프는 광원으로서는 다양한 색상의 LED를 사용할 수 있기 때문에 full-color를 포함한 매우 다채로운 색상을 구현할 수 있다. 뿐만 아니라, 유연성이 매우 좋은 플라스틱 광섬유를 바탕으로 하기 때문에 라인램프의 layout을 설치현장에 맞도록 손쉽게 바꿀 수 있다는 장점도

갖는다. 이와 같은 특성의 라인램프는 장식용 조명분야에서 많은 응용이 기대되는데, 이를 위해서는 먼저 높은 광결합효율을 갖는 LED-광섬유 결합기를 전문적으로 제작할 수 있는 LED 램프 제조업체들의 참여가 선행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2008년도 충남대학교 학술연구비 충남대학교의 자체연구비 지원계획의 도움을 받아 이루어졌다.

References

1. N. Ohta and A. R. Robertson, *Colorimetry: Fundamentals and Applications* (John Wiley & Sons, UK, 2005), Chapter 3.
2. Fiber optic fx, ltd, "Side emitting cable," <http://www.fibreopticfx.co.uk>
3. S. J. Lee, "Backlight for liquid crystal display using leaky optical fiber," Korea patent 10-0606247 (2006).
4. Y. Li and L. Xu, "High efficient light coupling of solid-state light source into etendue maintained optical waveguide/fiber," PCT patent WO 2006/102846 A1 (2006).
5. S. J. Lee, "Analysis of light-emitting diodes by Monte Carlo photon Simulation," *Appl. Opt.* **40**, 1427-1437 (2001).
6. S. J. Lee, "Study of photon extraction efficiency in InGaN light-emitting diodes depending on chip structures chip mount schemes," *Opt. Eng.* **45**, SPIE, 1/014061-14/014061 (2006).