

태양광 조명 시스템의 집광 효율 향상을 위한 정렬 및 패키징 기술

김태훈¹ · 신병한² · 정명영^{1,†}

¹부산대학교 인지메카트로닉스공학과, ²태양조명(주)

Alignment and Packaging Technology for Improving The Efficiency of The Solar Daylighting System

Taehoon Kim¹, Byung-han Sheen² and Myung Yung Jeong^{1,†}

¹Department of Cogno-Mechatronics Engineering, Pusan National University, Geumjeong-gu, Busan 609-735, Korea

²Sunlight Co., Ltd., 2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 609-836, Korea

(2014년 9월 16일 접수: 2014년 9월 24일 수정: 2014년 9월 25일 게재확정)

초 록: 본고에서는 태양광 조명 시스템 중 태양을 추적하며 오목한 형태의 반사경으로 태양광을 집광하고, 전기에너지로 변환과정 없이 그대로 조명으로 사용하는 시스템의 효율 향상에 대해 다뤘다. 반사경 및 렌즈들의 초점거리, 위치 등에 따라 시스템 전체의 효율이 크게 좌우되고, 제품의 조립 및 제작 과정, 외적 환경요인 등에 의해 렌즈 및 거울 간의 정렬 상태가 집광효율에 상당한 영향을 준다. 시뮬레이션을 통해 최대효율을 내기 위한 convex lens의 위치를 확인하였다.

Abstract: In this work, we investigated the efficiency improvement of concave mirror based solar daylighting system that does not convert light to electricity. Total efficiency of the system is substantially affected by external environment and focusing position, alignment of reflectors, lenses. As a result of simulation, we obtained the max. efficiency in which depends on convex lens position.

Keywords: Solar daylighting, Optical fiber, Alignment, Tolerance

1. 서 론

화석연료의 고갈과 환경오염에 대한 우려로 신재생에너지에 대한 세계적 관심이 매우 높다. 풍력, 조력, 태양에너지 등 여러 신재생에너지에 대한 연구가 이루어지고 상용화도 이루어지고 있다. 그 중 태양광 조명 시스템에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다. 태양광 조명 시스템은 태양광을 이용하여 주간 전기조명을 대체할 수 있도록 고안된 장치이다. 태양광 조명 장치는 햇빛을 그대로 이용하여 에너지를 아낄 수 있고, 온실가스 배출도 줄일 수 있다. 뿐만 아니라 건강과 환경개선, 심리적 안정 등 well-being 측면에서도 태양광 조명이 각광받고 있다.¹⁻³⁾

태양광 조명 시스템은 하루 종일 태양광을 받을 수 있도록 주로 건물의 천장에 설치된다.⁴⁾ 시스템의 유형은 크게 수동형과 능동형으로 구분할 수 있다. 수동형의 시스템은 설치가 간편하고, 그 비용이 저렴하지만, 효율이 떨어진다. 능동형 시스템은 태양을 추적하기 위한 별도의

기계적 장치 및 이를 구동하기 위한 외부 에너지가 필요하다. 이런 요소는 능동형 태양광 조명 시스템의 구조를 복잡하게 만들고, 그 비용을 증가시키지만, 수동형 시스템에 비해 태양광을 잘 집광할 수 있게 한다.⁵⁾

덕트(Duct) 등을 이용한 수동형 태양광 조명장치는 설치 시 건물 천장에 천공을 크게 만들어야 하고, 다층 건물의 경우 꼭대기 층에서만 사용이 가능하다는 단점이 있다. 능동형 태양광 조명장치는 대구경의 렌즈 혹은 반사거울을 통해서 태양광을 집광하고 이를 광케이블을 통해 전송하는 방식이 두루 이용된다. 태양광을 효율적으로 집광하기 위해 필수적으로 태양 추적 장치가 이용되어야 하고, 태양 추적 장치의 아주 작은 추적 오차도 시스템의 효율에 상당한 영향을 미치는 단점이 있지만 수동적 형태의 태양광 조명장치에 비해 높은 효율을 낼 수 있고, 장거리 전송이 가능하며, 좁은 지역에도 설치가 가능하다.^{6,7)}

능동형 태양광 조명장치는 크게 convex lens를 이용하여 집광하는 방식과 concave mirror를 이용하는 방식이 있

[†]Corresponding author
E-mail: myjeong@pusan.ac.kr

© 2014, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

다. Convex lens를 이용하여 대용량 집광을 구현하고자 하는 경우, 그 구경을 키우기 위해 천문학적인 비용이 소모되어 실용적이지 못하다. 이 문제를 개선하여 저비용, 고용량의 장치를 구성하기 위한 하나의 방안이 concave mirror를 이용하는 것이다. Concave mirror는 같은 구경의 렌즈에 비해 그 제조단가가 저렴하다. 또한 비구면 parabolic concave mirror를 이용하여 시스템을 구성하면 색수차 및 구면 수차를 제거하여 햇빛과 유사한 스펙트럼 패턴을 가진다.⁶⁾

Concave mirror를 이용한 대부분의 태양광 조명 시스템의 경우 concave mirror, convex mirror, convex lens 등 다단 구조를 가지는데, 제품 제작 상의 문제로 각각의 렌즈와 거울이 최적화된 위치에서 벗어날 때 효율이 급격히 떨어지는 문제가 있다. 본고에서는 이러한 문제를 해결하고자 concave mirror를 이용한 태양광 조명 시스템에서 실제 상용 제품 출시를 위한 최적 정렬 구조와 공차설계를 제안한다.

2. Concave mirror 기반 능동형 태양광 조명 시스템

국·내외에서 개발된 concave mirror 기반 태양광 조명 시스템은 일반적으로 convex mirror를 concave mirror의 초점 부근에 설치한다. 또, 경우에 따라 광케이블로 입사시키는 태양광량을 최대화하기 위해 1개 이상의 convex lens 및 ball lens 등을 이용한다. 렌즈를 더 이용하는 경우 convex mirror에서 반사된 태양광을 보다 쉽게 광케이블로 전송할 수 있으나, 렌즈의 추가 사용에 따른 비용 발생, 각각의 렌즈에 의한 수차 문제, 정렬 문제가 추가로 발생할 수 있다.

본고에서 다루는 태양광 조명 시스템은 각각 1개의 concave mirror, convex mirror, convex lens, ball lens를 이용한다. concave mirror에 수직으로 입사한 태양광은 초점을 향해 반사된다. 반사된 태양광은 convex mirror에 의해 concave mirror의 중심을 향해 다시 반사되고, convex lens와 ball lens에 의해 굴절되어 광케이블로 입사한다. 광케이블에 입사된 태양광은 목적 지점까지 전송되어 발광(發光)된다.

이 시스템은 concave mirror에 태양광이 수직으로 입사하여야 하므로 필수적으로 태양을 추적할 필요가 있다. 여기서 태양추적 오차에 의한 태양조명 시스템의 효율저하가 있을 수 있다. 또한, convex mirror의 설치에 있어서, concave mirror와의 축 정렬 어긋남, displacement 오차, convex mirror의 tilting에 의한 효율저하도 발생한다. 태양추적 오차에 의한 효율저하는 지구의 자전·공전 알고리즘, 이미지센서, 조도센서 등을 이용한 정밀한 태양광 추적 장치를 사용하여 개선될 수 있다. 하지만 태양열, 바람 등 외부 요인에 의해 convex mirror의 위치가 어긋나서 발생하는 효율저하를 개선하기 위한 장치는 없는 실

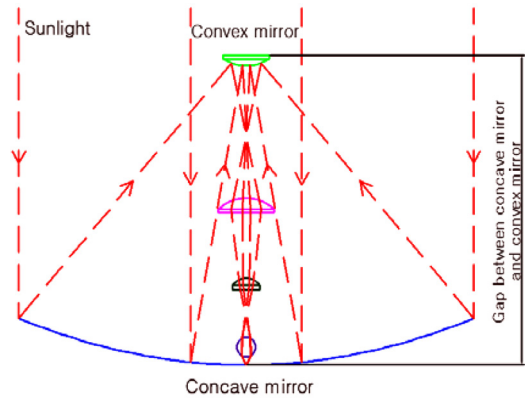


Fig. 1. Schematic diagram of the solar daylighting system based on concave mirror.

정이다. 외부 요인에 의해 convex mirror의 위치가 어긋나더라도 태양광 조명 장치의 효율저하를 최소화 할 수 있도록 적절한 공차를 가지는 convex mirror 선정에 대하여 시뮬레이션 및 실험을 진행하였다.

3. 최적 구조 및 공차 설계

Convex mirror 위치의 오차에 대해 다음과 같은 좌표계를 설정하였다. Concave mirror와 convex mirror 간 수평 방향으로 축 정렬이 어긋나는 것을 X, concave mirror와 convex mirror의 gap을 Y, convex mirror의 tilting을 α 로 정의하였다.

실험 및 시뮬레이션에 사용한 concave mirror는 초점거리 150 mm, 직경 250 mm이고, convex mirror는 직경 25 mm, 곡면 radius 25.95 mm, 두께 5.21 mm이다. Convex lens는 직경 30 mm, 곡면 radius 23.54 mm, 두께 6.90 mm, 초점거리 30 mm이다. Ball lens는 직경 10 mm이다. 위치의 오차에 대해 비교적 민감도가 크지 않은 convex lens와 ball lens는 concave mirror와의 거리를 각각 50 mm, 10 mm로 고정하고 진행하였다.

Convex lens와 ball lens를 고정하고 광케이블 끝단을 ball lens에 밀착시켜 배치하고, concave mirror와 convex mirror 간 거리의 최적값을 찾기 위해 Light Tools 7.2 이용한 시뮬레이션을 진행하였다. Convex mirror에 의해 태양광이

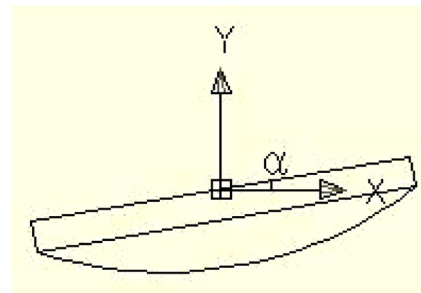


Fig. 2. Coordinates system of the convex mirror error.

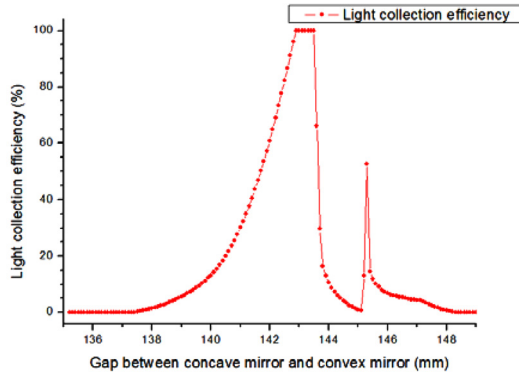


Fig. 3. Light collection efficiency affected by the gap between concave mirror and convex mirror(convex lens and ball lens were fixed at 50 mm, 10 mm from center of the concave mirror).

가려지거나, concave mirror에서 반사된 태양광이 convex lens에 의해 초점으로 진행하지 못하는 영역을 제외하고 25,000개의 평행 광선을 concave mirror에 입사시켜 optical fiber 끝단에서 검출되는 광선의 수를 측정하였다.

시뮬레이션 결과 concave mirror와 convex mirror 사이 거리가 143.2 ± 0.3 mm에서 25,000개의 광선이 모두 광케이블 끝단에서 검출되었다. Fig. 3을 살펴보면 143.2 mm 부근에서 최대값을 가진다. 143.5 mm~145.2 mm 사이에 효율이 급격히 줄어들고, 145.3 mm에서 다시 높아졌다 줄어든다. 원인은 광케이블 끝단을 ball lens에 밀착시켜 둔 것에 있다. Convex lens와 ball lens를 지난 태양광이 초점을 형성하기도 전에 광케이블이 위치하여, 많은 태양광이 광케이블로 입사되지 못하고 새어 나가 다시 concave mirror에 반사되어 외부로 방출된다. 이런 현상은 광케이블의 위치를 ball lens에서 떨어뜨려 설치하는 것으로 개선할 수 있다. Fig. 4는 145.3 mm 이후 효율이 급감하는 구간에 한하여 ball lens에서 광케이블을 떨어뜨려 효율을 개선한 것이다. 하지만 실제 상용제품에 적절하게 광케이블을 떨어뜨리면서 효율을 개선하는 방법은 좋

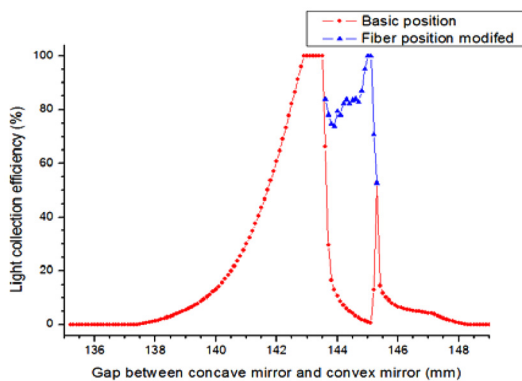


Fig. 4. Light collection efficiency affected by the gap between concave mirror and convex mirror(fiber position modified, convex lens and ball lens were fixed at 50 mm, 10 mm from center of the concave mirror).

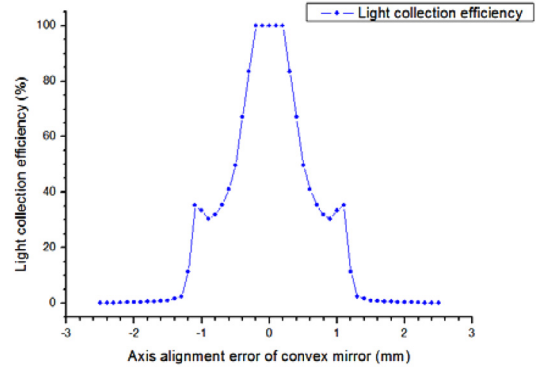


Fig. 5. Light collection efficiency which depended on axis alignment of convex mirror(X direction).

지 않다. 광케이블의 설치, 유지·보수를 위한 광케이블의 교체 등의 작업에 있어 매우 불리하기 때문이다. 이 시뮬레이션 결과에서 convex mirror와 concave mirror와의 적정 거리는 143.2 ± 0.3 mm에서 최대 효율을 가질 수 있음을 확인했다.

다음으로, concave mirror의 중심축과 convex mirror의 중심축간 정렬이 틀어지는 문제에 대해 시뮬레이션을 진행하고, Fig. 5에 나타내었다. 앞선 시뮬레이션 결과를 바탕으로 convex mirror를 concave mirror 표면으로부터 143.2 mm 지점에 위치한 후 0.1 mm 단위로 X 방향으로 어긋나게 하고, 25,000개의 평행 광선을 입사시켜 광케이블 끝단에서 검출되는 광선의 수를 측정하였다. Convex mirror의 위치가 중심축에서 ± 0.2 mm 내에 25,000개의 광선이 모두 광케이블 끝단에서 검출되다가, 그 이후로 급격히 줄어들었다.

이어서, convex mirror의 tilting에 대한 시뮬레이션을 진행하였다. 최초 convex mirror와 concave mirror가 완전히 평행하게 놓인 상태에서 convex mirror를 0.1°씩 회전시키며 시뮬레이션을 진행하였다. Convex mirror의 tilting에 대한 시뮬레이션 결과, $\pm 0.4^\circ$ 의 범위에서 반사경에 입사한 광선이 모두 광케이블 끝단으로 진행하였다.

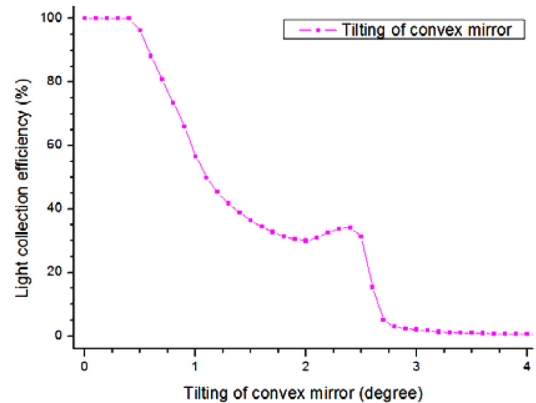


Fig. 6. Light collection efficiency affected by tilting of convex mirror(α direction).

4. 실험 및 검토

램프 뒤쪽의 광케이블을 통해 태양광이 전송되고 있는 것을 확인할 수 있다. 광케이블 끝단에서 전송된 태양광을 그대로 방출할 경우 방출각이 약 60° 로 비교적 넓게 방출되므로, 방출각이 크지 않도록 광케이블 끝단에 반사각 형태의 케이스를 씌워 down light의 형태로 발광하였다. Lux meter를 이용, 외부 조도를 측정하고, 최종 광케이블을 통해 전송되는 태양광의 조도를 측정하였다.

각 렌즈와 거울의 반사율, 투과율 데이터와 측정된 외부와 반사경의 데이터로 시뮬레이션 해본 결과, 광케이블 끝단 1 mm 지점에서 약 640,000lx의 조도가 나왔고, 시뮬레이션 결과를 검증하기 위해 태양광 조명 장치를 구성하고, 실험을 진행하였다. 실험 시, 장치 구성의 한계로 convex mirror의 X 및 α 방향으로 위치 및 각도를 정밀하게 설정하기 어려워 각각 최적화된 위치에 고정하고, Y 방향으로만 시뮬레이션 상 최대 효율을 보이는 지점과 ± 1 mm 지점에서 실험을 진행하였다. 야외에서 태양광을 집광하고, 10 m의 광케이블을 통해 실내로 전송하였다. 실제 실험 장치를 구성해 측정한 결과에서는 최적화된 위치에서 336,000lx의 조도를 얻을 수 있었고, +1 mm 지점에서는 52,000lx, -1 mm 지점에서는 68,000lx로 조명량이 급격히 줄어들었다. Convex mirror가 최적화된 위치에서 시뮬레이션 결과의 52.5%로 절반가량의 조도만 얻을 수 있었는데, 실험 시 여러 요인이 복합적으로 작용하여 조명 전송량을 줄였을 것으로 보인다. Concave mirror에 입사하는 태양광이 수직에서 어긋나면 다소 오차가 있을 수 있고, concave mirror의 표면 결함도 광케이블을 통해 전송되는 광량을 줄이는 원인이 되었을 것으로 보인다. 더불어, ball lens 끝단에서 광케이블이 잘 고정되지 않는 경우, ball lens를 통해 집속된 태양광이 광케이블로 입사하지 못하거나, 광케이블 홀더와 광케이블 사이 작은 외력에 의해 lateral deformation이 발생하여 상당한 손실이 생긴다.⁸⁾ 광케이블 alignment 및 외력에 의한 손실 저하를 막기 위해서는 광케이블에 가해지는 외력을 최소화 하고, ball lens 끝단에서 광케이블로 집속된 태양광을 잘 입사시키기 위한 패키징 기술이 필요하다. 광 PCB 등에서 사용하기 위한 광 연결 및 패키징에 관한 연구가 진행되고 있는데, 그 중 광섬유 커넥터를 이용한 광 인터커넥션 연구는 태양광 조명 시스템에도 적용할 수 있을 것이다. 더불어, 광도파로와 광케이블 간의 분기 및 인터커넥션에 관한 연구를 통해⁹⁾, 추후 태양광 조명 시스템 전체에 사용되는 광케이블을 줄여, 설비 가격을 낮추는데 이용할 수 있을 것이다. 또한, 렌즈 일체형 광도파로를 이용한 고효율 수동 광 PCB 접속 구조 설계에서 제안한 concept를 이용하면¹⁰⁾, 광케이블을 급격히 꺾을 수 없어, 광케이블 끝단 발광 장치 설치에서 천장 매립이나, 다양한 형태의 발광 소자 구성이 어려웠던 점을 해결할 수 있다.



Fig. 7. Down light lamp of solar daylighting system.

앞선 시뮬레이션에서 집광 효율 저하를 유발하는 각각의 요인들 중 하나의 요인만 변수로 두고 나머지는 최적화된 상태로 고정하여 진행했지만, 본 실험에서는 태양광 입사각도, concave mirror의 표면 결함 등 여러 가지 요인이 작용하면서 집광효율을 줄였을 수 있다. 실제로 상용화 되고, 사용되는 태양광 직접 조명 장치는 여러 요인이 복합적으로 작용할 수 있으므로 다수의 변수를 이용하여 보다 정교한 시뮬레이션 및 실험을 진행할 필요가 있다. 이 시뮬레이션 결과를 이용해 조명 장치를 구성하고, 실제 장치로 사용 가능 여부를 판단, 신뢰성을 확보하기 위해서는 본 조명장치가 설치된 암실을 구성하여, KS C7612에서 지정하는 조도 측정방법에 의거 실험을 진행할 필요가 있다. 또한, 신재생에너지 설비심사세부기준 - 태양광집광채광기(NR PV 601:2007)등에서 정하는 시험 방식대로 실험을 진행하여 효율 및 평균조도를 산출하여야 한다. 본고에서 다룬 태양광 조명 장치와 유사한 장치를 구성한 실험에서 약 22%의 효율로 평균 250lx 가량의 조명을 설치한 사례가 있는데²⁾, 이는 일반 사무실, 학교 등에서 사용하기에 부족하지 않은 수치이다.

5. 결 론

시뮬레이션 및 실험을 통하여 집광효율 향상에 관한 연구를 수행하였으며, 초점거리 150 mm의 concave mirror를 이용할 경우, 최대의 효율을 낼 수 있는 convex lens의 위치가 143.2 ± 0.3 mm(vertical), 0 ± 0.2 mm (horizontal), $0 \pm 0.4^\circ$ (tilting)임을 도출하였다. 초점거리가 비교적 길지 않은 concave mirror를 이용하는 경우, convex mirror를 설치할 수 있는 위치의 범위가 ± 0.3 mm 가량으로 매우 작다. Concave mirror의 초점거리를 길게 하여 이를 완화시킬 수 있지만, convex mirror를 고정하기 위한 홀더도 같이 길어져야해 외부 환경요인에 의한 변형 등에는 더 민감해진다. 용도 및 환경에 따라 concave mirror의 초점거리 및 지름은 많이 달라질 수 있다. 시뮬레이션을 통해 최대 효율을 낼 수 있는 convex mirror의 정렬 조건을 규명하였으며, 이는 향후 상용화에 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 중소기업청 산업혁신기술개발 사업의 연구

비 지원으로 수행된 연구결과입니다.

References

1. C. Sapia, "Daylighting in buildings: Developments of sunlight addressing by optical fiber", *Solar energy*, 89, 113 (2013).
2. T. K. Sung, C. S. Lee, J. M. Kim, C. B. Joung and B. C. Kim, "Development of solar daylighting system using parabolic mirrors", *Korean journal of air-conditioning and refrigeration engineering*, 25(5), 240 (2013).
3. N. Kumar and S. Patil, "Solar Day-Lighting Using Optical Fibers", *International Conference on Fiber Optics and Photonics- Solid State Lighting & Green Photonics*, W3A, 6 (2012).
4. I. Ullah and S. Y. Shin, "Highly concentrated optical fiber-based daylighting systems for multi-floor office buildings", *Energy and Buildings*, 72, 246 (2014).
5. H. J. Han, S. B. Riffat, S. H. Lim and S. J. Oh, "Fiber optic solar lighting: Functional competitiveness and potential", *solar energy*, 94, 86 (2013).
6. C. S. Lee, J. M. Kim, Y. M. Park, T. K. Sung, C. B. Joung, S. H. Kang and B. C. Kim, "Development of Tracking Day-lighting System Using Multi-Parabolic Reflector", *Journal of the Korean Solar Energy Society*, 33(2), 55 (2013).
7. J. Song, Y. Zhu, Z. Jin and Y. Yang, "Daylighting system via fibers based on two-stage sun-tracking model", *Solar energy*, 108, 331 (2014).
8. D. Gloge, "Optical-Fiber Packaging and Its Influence on Fiber Straightness and Loss", *The Bell System Technical Journal*, 54(2), 245(1975).
9. D. M. Kim, J. H. Ryu and M. Y. Jeong, "Optical Packaging and Interconnection Technology", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 19(4), 13 (2012).
10. D. M. Kim, T. K. Lee, T. H. Lee and M. Y. Jeong, "Design for High-Efficient Passive Optical PCB Interconnection by Using Built-in Lens Structure", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 19(2), 47 (2012).