

클래딩이 있는 플라스틱 광섬유 테이퍼를 이용한 용액 굴절률 센서

김광택^{1*} · 김희만¹ · 윤중현²,

Liquid Refractive Index Sensor Based on Cladded Plastic Optical Fiber Taper

Kwang Taek Kim^{1,*}, Hoe Man Kim¹, and Jung Hyun Yun²

Abstract

We have investigated a refractive index sensor based on a cladded plastic optical fiber taper. The optical transmission and sensing characteristics of the device were illuminated in terms of ray optics. The sensor devices showed that the optical transmittance strongly depends on the refractive index of the external medium surrounding the tapered region.

Keywords : Plastic Optical Fiber, Refractive Index Sensor, Tapering, Ray Optics

1. 서론

광섬유 센서는 높은 감도에 의한 정밀측정, 원거리 측정, 다중분포 측정, 및 전자파 무간섭 특성 등 많은 장점으로 인하여 그 응용이 매우 다양하다. 특히 플라스틱 광섬유(plastic optical fiber:POF)는 코어가 커서 광원과 결합이 용이하고 유연성이 높아 근거리 통신이나 센서 시스템에 많이 적용되고 있다. 플라스틱 광섬유 센서는 외부형 센서[1-5]와 플라스틱 광섬유 자체가 센서로 동작하는 내부형 센서[6, 7]로 대별된다. 일반적으로 외부형 플라스틱 광섬유 센서의 구조로 광섬유 끝단에 광센서가 부착된 반사형 센서 구조가 가장 많이 활용되고 있다. 내부형 센서 형태로 플라스틱 광섬유의 클래딩을 제거하여 외부 물질과 소멸장 결합(evanescent field coupling)을 이용한 방법[6]과 외부 압력에 의해 발생하는 구부림 손실을 이용하는 방법[7]등이 보고 된 바 있다. 최근 유리광섬유나 플라스틱 광섬유를 테이퍼링하여 물리 및 바이오 센서로 활용하기 위한 연구가 많이 보고되고 있다[8-11]. 대부분의 경우 광섬유 테이퍼를 이용할 때 외부 물질에 소산장 결합이나 소산장(evanescent field) 흡수에 방식을 이용하고 있다[8-11].

본 논문에서는 클래딩이 있는 테이퍼링된 플라스틱 광섬유를 활

용한 외부 물질의 굴절률을 측정하기 위한 센서를 제안하였다. 언덕형 굴절률 분포를 가지는 플라스틱 광섬유 테이퍼의 굴절률 센서기능에 대하여 이론적 분석이 보고된 바 있지만[12] 구체적인 실험 결과는 아직 알려져 있지 않다. 본 논문은 플라스틱 광섬유 테이퍼를 광센서로 적용함에 있어 소산장 감지 방법을 이용하는 것이 아니라, 테이퍼링된 영역에서 도파되는 광량이 외부 물질의 굴절률에 의존하는 현상이 있음을 광선이론으로 설명하고 이를 굴절률 센서로 활용할 수 있음을 실험으로 증명하였다.

이론적 예측을 실험적 결과와 비교해 본 결과 이론과 실험결과가 잘 일치 하였다. 제안된 소자를 광센서 시스템에 적용시 열적 안정성이 높은 LED를 광원으로 활용할 수 있고, 출력광의 세기 변화를 이용하기 때문에 광검출 시스템을 간단하고 구현할 수 있는 장점이 있다.

2. 소자 구조 및 동작이론

Fig. 1은 본 논문에서 고려하는 클래딩이 있는 플라스틱 광섬유 테이퍼를 이용한 굴절률 센서 구조이다. 플라스틱 광섬유의 중심 허리 부분까지 점점 가늘어지며 테이퍼링된 영역이 외부 용액으로 둘러 쌓여 있다. 소자의 양쪽 끝단 사이의 광파워 광전달비(transmittance)가 외부 용액의 굴절률에 의존하는 성질을 이용하여 센서로 활용 할 수 있다. 여기서 광파워 전달비(transmittance)란 소자의 왼쪽 입력단에서의 광파워와 오른쪽 출력단에서의 광파

¹호남대학교 전자광공학과(Department of Electronics and Photonics, Honam University)

²조선이공대학교 광전자정보과(Department of Photoelectronics Information, Chosun College of Science & Technology)

*Corresponding author: ktkim@honam.ac.kr

(Received : Oct. 25, 2011, Revised : Jan. 28, 2012, Accepted : Mar. 7, 2012)

위비를 의미한다. 본 논문은 소자의 거동 특성을 해석하기 위해 상용화된 LightTools 프로그램을 이용하였다.

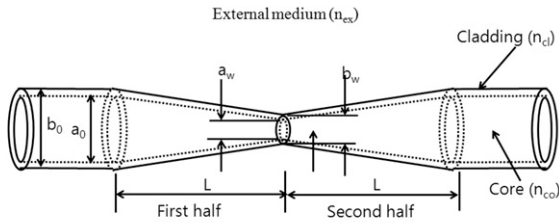


Fig. 1. Structure of proposed POF taper sensor.

소자 분석을 위해 플라스틱 광섬유의 코어 지름(a_0) 및 클래딩 외경(b_0)이 각각 1.0 mm 와 0.98 mm 로 가정하였다. a_w 와 b_w 는 소자의 중심부에서 코어의 지름과 클래딩 외경을 의미한다. 클래딩의 굴절률은 1.41 이고 코어의 굴절률은 1.49로 설정하였다. 이러한 조건을 고려하면 최대 수용각은 28° 이다. 소자의 특성을 결정하는 주요 변수로서 테이퍼링비, 즉, 테이퍼링 전후 코어 지름의 비 (a_w/a_0), 테이퍼링 길이(L)와 외부 물질의 굴절률로 설정하였다. 테이퍼링 영역에서 코어와 클래딩은 같은 비율로 외경이 감소하는 것으로 가정하였다. 광원은 파장이 635 nm 이며, 람버터(Lambert) 빔 패턴을 가진 LED로 가정하였다.

Fig. 2는 테이퍼링비가 0.5이고 L이 5 mm 일 때 소자를 통과하는 과정에서 광선 경로를 보여준다. Fig. 2(a)는 테이퍼링 영역 밖이 공기층으로 둘러싸여 있는 경우에 극히 일부 광선만 공기층으로 누출된다. Fig. 2(b)는 테이퍼링된 외부에 굴절률이 1.41인 물질(용액)이 둘러싸고 있는 경우로 많은 광선이 플라스틱 광섬유 밖으로 누설되는 현상을 볼 수 있다. 코어가 점점 가늘어지면 광선중 입사각이 큰 것부터 전반사 조건을 만족하지 못하여 용액 밖으로 광선이 누설되는 현상을 볼 수 있다. 외부 물질의 굴절률(n_{ex})이 상대적으로 큰 경우를 나타내는 Fig. 2(b)에서 더 많은 광선이 플라스틱 광섬유 테이퍼 밖으로 누설되는 현상을 보이고 있다.

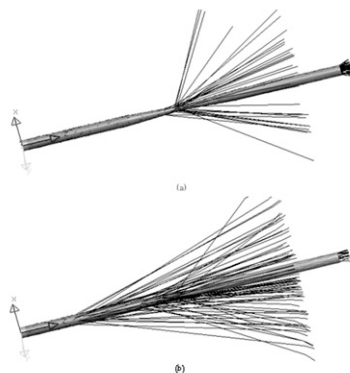


Fig. 2. Optical ray traces of POF taper (a) $n_{ex}=1.0$ (air), (b) $n_{ex}=1.41$ (liquid).

Fig. 3은 테이퍼링 길이는 5 mm 로 고정하고, 테이퍼링 비와 테이퍼링 영역을 둘러싸고 있는 용액의 굴절률에 따른 광 전달 특성을 시뮬레이션 한 결과이다. 동일한 테이퍼링 비를 가질 때 용액의 굴절률이 1.33에서 1.41까지 점점 증가하면 광파워 전달비(transmittance)가 감소함을 알 수 있다. 그 후 굴절률이 플라스틱 광섬유 클래딩보다 더 클 경우 광전송비가 약간 증가하는 현상을 볼 수 있다. 이러한 특성을 다음과 같이 이해 할 수 있다. 외부 물질의 굴절률이 플라스틱 광섬유 클래딩보다 작을 때는 플라스틱 광섬유는 이중 코어를 가진 광섬유로 동작한다. 즉 플라스틱 광섬유의 클래딩이 외부 물질에 대하여 코어역할을 한다. 따라서 광섬유 코어와 클래딩 경계에서는 전반사 조건을 만족하지 못하지만 클래딩과 외부 용액사이의 경계에서 전반사 조건을 만족하는 광선이 존재 할 수 있다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 제안된 소자의 왼쪽 절반에서는 코어가 점점 가늘어지기 때문에 중심으로 갈수록 광선의 입사각이 줄어들어 여러 광선 중 코어와 클래딩 경계에서 전반사 조건을 만족하지 못하는 광선의 수가 증가 하게 된다. 하지만 이들 전반사조건을 만족하지 못하는 광선들 중 클래딩과 외부 용액의 경계에서 전반사 조건을 만족하는 광선이 소자의 중심부까지 누설되지 않고 전달이 되면 이러한 광선들이 코어가 점점 커지는 소자의 오른쪽 영역에서 다시 코어와 클래딩 경계에서 전반사 조건을 만족하게 된다.

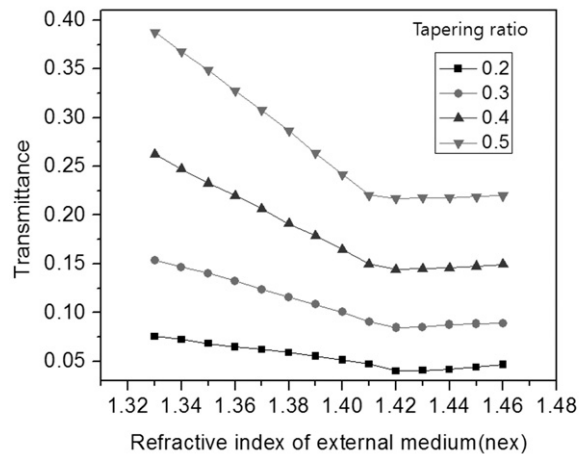


Fig. 3. Optical power transmittance according to refractive index of external medium(n_{ex}) surrounding the tapered region.

외부 물질의 굴절률이 작을수록 광파워 전달비가 커지는 이유는 클래딩과 외부 용액의 경계에서 누설되지 않고 소자의 중심부까지 전달되는 광선량이 많기 때문이다. 외부 용액의 굴절률과 클래딩의 굴절률이 동일한 경우 클래딩의 두께는 무한대로 가정할 수 있으며 클래딩과 용액사이의 반사광은 존재 하지 않는다. 이때 가장 광파워 전달비가 작게 된다. 외부 물질의 굴절률이 광섬유 클래딩 보다 더 큰 경우 클래딩과 외부물질사이에 프레넬 반사가 존재하며 이로 인하여 일부 광선들이 코어가 확대되는 소자의 오른쪽 영역에서 재결합한다. 굴절률 차이가 클수록 프레넬 반사의 크기가 커지기 때문에

광파워전달비가 증가하는 현상을 예측할 수 있다.

Fig. 4는 테이퍼 소자의 중심에서 코어의 크기는 고정하고 테이퍼링 길이를 달리하여 광파워전달비를 계산한 결과이다. 테이퍼링 외부 물질은 공기로 가정하였다. 그림으로 알 수 있듯이 광파워전달비는 테이퍼링 길이(L)에 거의 의존하지 않음을 알 수 있다. 코어와 클래딩에서 전반사를 만족하는 광선의 개수는 주로 테이퍼링 비에 의해서 결정되며 테이퍼링 길이와는 무관함을 알 수 있다.

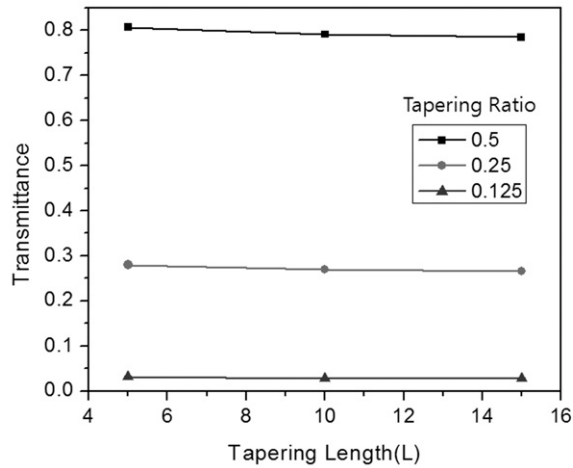


Fig. 4. Optical power transmittance according to tapering length, $n_{ex}=1.0$.

3. 실험 및 분석

본 논문의 실험에 사용된 플라스틱 광섬유(POF)의 외경은 1.0 mm 이고, 코어 지름은 0.98 mm 이다. 코어를 둘러싼 클래딩층의 두께는 10 μ m 로서 코어 외경에 비해 매우 작다. 내경이 1.0 mm 인 원통형 쿼츠봉 외부에 재질이 니크롬인 열선이 부착되어 있다. 니크롬선은 전기 히터로 동작하며 저항은 50 ohm 이고 가열 부위는 20 mm 정도이다. 니크롬선에 DC 전류를 가하여 쿼츠봉을 가열하고, 플라스틱 광섬유를 가열한 상태에서 이를 양쪽으로 잡아 당기면 가열된 부위가 늘어나면서 이 부분 가늘어진다.

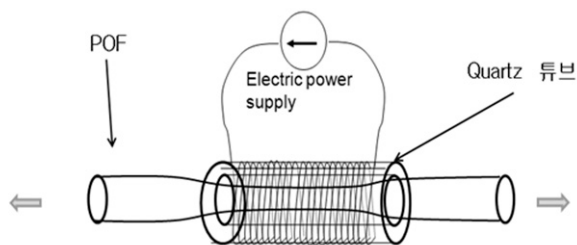


Fig. 5. Concept of fabrication of the POF taper.

Fig. 6는 플라스틱 광섬유 테이퍼를 제작하기 위한 장치의 사진이다. 이 장치는 플라스틱 광섬유를 양쪽으로 잡아당기는 속도와 테이퍼링 길이를 제어할 수 있는 기능을 가지고 있다. 본 논문은 POF를 양쪽으로 잡아 당기는 길이를 조절하여 소자의 머리 부분의 두께를 조절하였다.

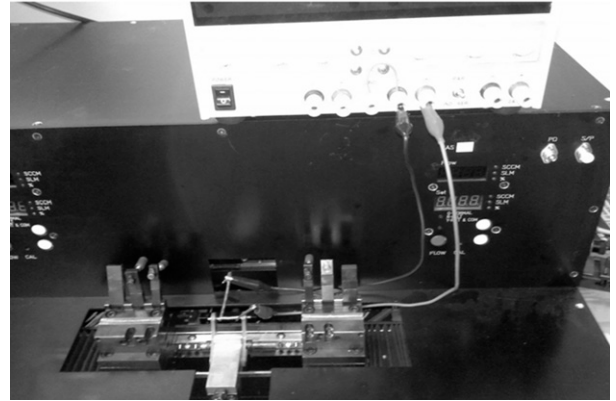


Fig. 6. Fabrication unit of POF taper.

제작된 4종류의 POF 테이퍼의 중심 부분을 확대한 사진이 Fig. 7에 제시되어 있다. 제작된 POF의 테이퍼 소자의 특성을 측정하기 위해 광원으로 중심파장이 635 nm 인 LED를 사용하였고, POF의 총 길이는 1 m 이다. POF 양 끝단을 연마하고 테이퍼링된 영역위를 다양한 굴절률을 가지는 용액으로 덮는다. 본 논문에서는 물과 글리세린의 혼합비를 조절하여 원하는 굴절률을 가진 용액을 준비하였다.

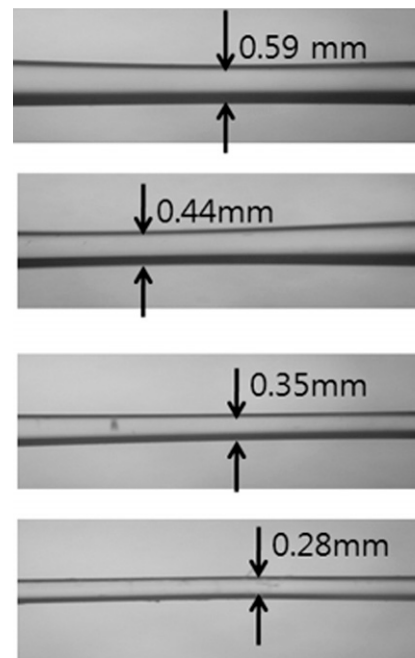


Fig. 7. Pictures of 4 different POF tapers with different waist size(b_w).

Fig. 8은 중심부위의 두께가 서로 다른 4종류의 POF 테이퍼의 외부 용액의 굴절률 변화에 따른 광파워 전달비를 측정된 결과이다. 소자의 센서 특성은 이론적 예측과 마찬가지로 외부 용액의 굴절률이 증가하면 입력과 출력사이에 광손실이 증가하는 현상이 관측되었다. 즉 외부에 클래딩이 남아 있음에도 불구하고 테이퍼링된 영역 외부를 둘러싸는 용액의 굴절률에 광파워 전달비가 의존하는 성질을 보였다. 이러한 현상은 테이퍼링전에는 나타나지 않은 현상이다. 용액의 굴절률 측정의 한계가 있음도 이론적 예측과 일치하는 결과를 보였다. 외부 용액의 굴절률에 대한 광파워 전달비의 변곡점의 위치가 이론적 예측과 실험적 결과에 사이에 약간의 불일치 있었다. 이론적 예측에선 변곡점의 위치가 외부 물질의 굴절률이 1.41부근에서 발생하지만 실험에서는 용액의 굴절률이 1.45 부근에서 관측되었다. 이러한 오차는 용액의 굴절률 측정시의 오류나 플라스틱 광섬유의 굴절률이 이론에서 설정한 값과 불 일치 해서 발생할 수 있다. 그 외 클래딩이 중심부위에서 매우 얇기 때문에 이론에서 고려하지 않았던 코어와 외부 용액사이의 소산장 결합현상이 발생할 수 있을 것으로 사려된다.

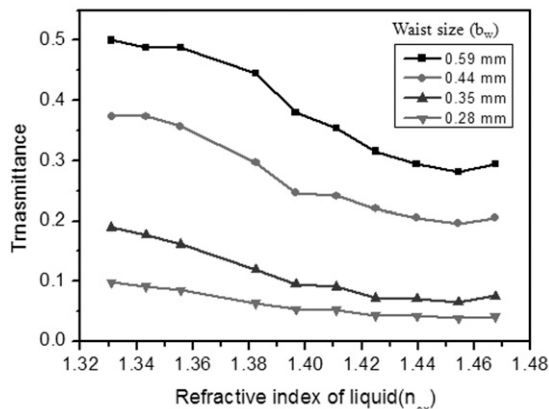


Fig. 8. The refractive index sensing property the fabricated POF taper.

제안된 센서는 바이오 용액의 굴절률을 측정하기 위한 용도로 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 일반적으로 바이오 물질의 굴절률 범위는 1.3~1.4 사이이며[13] 제안된 소자는 이 범위에서 굴절률에 따라 출력광의 세기가 변하는 센서로 동작하였다. 제안된 소자를 굴절률 센서로 활용할 때 센서 시스템의 분해능은 광원의 안정성과 광파워미터의 정확성에 달려 있다. 이 소자를 굴절률 센서로 이용할 때 광원으로 LD(Laser Diode)보다 LED(Light Emitting Diode)가 더 적합할 것으로 사료된다. 그 이유는 첫째 LED의 열 안정성이 LD보다 우수하고, 둘째 LD는 출력광의 지향성이 높아 플라스틱 광섬유의 코어내에서 다양한 경로를 가지는 광선을 여기 시키기 어렵다. 제안된 소자가 센서로 동작하기 위해서는 플라스틱 광섬유 코어내에 입사각이 다른 다양한 광선들이 포함되어 있어야 한다. 이러한 관점에서 보면 넓은 방사각을 가지는 LED가 광원으로 적합하다.

4. 결론

본 논문은 클래딩이 있는 플라스틱 광섬유 테이퍼의 굴절률 감지 특성에 대한 이론 분석과 실험 결과가 제시되고 있다. 기하광학적 기법으로 소자를 해석하였으며 제안된 구조는 클래딩 외부를 감싸는 물질의 굴절률에 광파워 전달비가 의존하는 현상을 가지고 있음을 보였다. 제안된 소자는 굴절률이 1.41 이하인 용액의 굴절률 측정이 가능하며 광의 세기 변화를 이용하기 때문에 검출 시스템 구현이 용이한 장점을 가지고 있다.

REFERENCES

- [1] Wook-Jae Yoo, Jang Kyoung-Won, and Jeong-Ki Seo, "Development of respiration sensors using plastic optical fiber for respiratory monitoring inside MRI system", *Journal of the Optical Society of Korea*, vol. 14, no. 3, pp. 235-239, 2010.
- [2] L. Mohanty and K.S.C Kuang "A breathing rate sensor with plastic optical fiber", *Applied Physics Letters*, vol. 97, no. 7, pp. 73703-73705, 2010.
- [3] Wook Jae Yoo, Jeong Ki Seo, Kyoung Won Jang, Jinsoo Moon, Ki-Tek Han, Jang-Yeon Park, Bongsoo Lee, Seunghyun Cho, Ji Yeon Heo, and Byung Gi Park, "Development of reflection-type fiber-optic pH sensor using sol-gel film", *Journal of Sensor Science and Technology*, vol. 20, no. 4, pp. 266-271, 2011.
- [4] Kyoung Won Jang, Dong Hyun Cho, Wook Jae Yoo, Jeong Ki Seo, Ji Yeon Heo, Bongsoo Lee, Sang Hun Shin, Byung Gi Park, and Sin Kim, "Measurement of relative dose irradiated from a Co-60 source using a scintillating fiber-optic dosimeter", *J. Kor. Sensors Soc.*, vol. 19, no. 1, pp. 52-57, 2010.
- [5] H. Suzumori, S. Honma, and M. Morisawa, "Plastic optical fiber sensor system for detecting multi-point gas leakages", *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, vol. 6829, p. 682921, 2008.
- [6] S. M. Lee and S. W. Kang, "Pattern recognition and characteristics of basic taste substances using the evanescent wave in multichannel optical fiber sensor", *J. Kor. Sensors Soc.*, vol. 9, no. 5, pp. 365-372, 2000.

- [7] J. Park “Plastic optical fiber sensor for measuring driver-gripping force, optical engineering”, *Journal of the Society of Photo-optical Instrumentation Engineers*, vol. 50, no. 2, pp. 20501-20503, 2011.
- [8] R. Gravina, G. Testa, and R. Bernini, “Perfluorinated plastic optical fiber tapers for evanescent wave sensing”, *Sensors*, vol. 9, pp. 10423-10433, 2009.
- [9] H. A. Rahan, S. W. Harun, M. Yasin, S. W. Phang, S. S. A. Damanhuri, H. Arof, and H. Ahmad, “Tapered plastic multimode fiber sensor salinity detection”, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 171, pp. 219-222, 2011.
- [10] K.Q. Kieu and M. Mansuripur, “Biconical fiber taper sensors”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 118, no. 21, pp. 2239-2241, 2006.
- [11] P. J. Wiejata, P. M. Shankar, and Mutharasan, R. “Fluorescent sensing using biconical tapers”, *Sensors and Actuators. B, Chemical*, vol. 96, no. 1/2, pp. 315-320, 2003.
- [12] J. Jimé nez, F. Aldabaldetrek, G. Durana, G. Zubia, J. Lomer, and M. Mateo, “Analysis of the use of tapered graded-index polymer optical fibers for refractive-index sensors”, *Optics Express*, vol. 16, no. 21, pp. 16616-16631, 2008.
- [13] H. Y. Lin, W. H. Tsai, and B. C. Sheu, “Side-polished multimode fiber biosensor based on surface plasmon resonance with hologen light”, *Applied Optics*, vol. 46, no. 5, pp. 800-805, 2007.



김 광 택 (Kwang Taek Kim)

- 1989년 2월 경북대학교 전자공학과(공학사)
- 1991년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
- 2000년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
- 2000년 3월~현재: 호남대학교 전자광공학과 교수
- 주관심분야: 광섬유 통신 소자 및 센서, 바이오광학 센서



김 회 만 (Hoe Man Kim)

- 1991년 2월 한밭대학교 전자공학과(공학사)
- 2011년 현재: 호남대학교 대학원 전기전자공학과 재학
- 주관심분야: 광통신, 광섬유 센서



윤 중 현 (Jung Hyun Yun)

- 1993년 2월 조선대학교 전자공학과(공학사)
- 1995년 2월 조선대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
- 1999년 8월 조선대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
- 2003년 9월~2006년 2월 (주)지피텍 기술이사
- 2006년 3월~2007년 2월 조선대학교 전자정보공과대학 전자공학과 초빙교수
- 2007년 3월~2010년 2월 조선이공대학 광전자정보과 전임강사
- 2010년 3월~2011년 5월 조선이공대학 광전자정보과 조교수
- 주관심분야: 염료 감응형 태양전지, 광 집적회로소자 및 광통신 시스템