

RF 소자의 표면탄성과 공진에 대한 광학적 측정

박준오¹, 장원권^{1*}

¹한서대학교 전자컴퓨터통신학부

Optical metrology for resonant surface acoustic wave in RF device

Jun-Oh Park¹ and Won Kweon Jang^{1*}

¹Division of Electron, Computer and Communication Engineering, Hanseo University

요약 표면탄성파를 이용한 RF소자의 성능을 단순히 작동 유무로만 평가할 수 있는 전기적인 성능 평가방법과 달리 위치에 따른 표면탄성파의 형성 정도를 실시간으로 검사할 수 있는 광학적 방법을 제시하였다. 광학적 방법을 이용한 표면 탄성파의 측정 조건과 한계를 제시하였고 간섭 및 회절 현상을 이용하여 RF신호의 입력 유무에 따른 광학적 해석을 하였다. 단일 모드 레이저를 이용하여 중심 주파수가 105MHz인 중계기 필터의 동작을 실험적으로 측정하고 이론적으로 분석하였다. 본 논문에서는 다기능 서비스를 제공하는 복합 주파수 RF 모듈의 고품질화를 위한 방법으로 표면탄성파의 에너지 분포를 시각화하고 실시간으로 평가할 수 있는 광학적 방법을 제시하였다.

Abstract Unlike the electric method capable of checking only product defect, the real time optical metrology is suggested for measuring and visualizing vibration with respect to position of surface acoustic wave in RF device. The measuring limits and conditions for surface acoustic wave is given, and the interference and diffraction due to RF signal are analyzed by optical interpretation. A single mode laser and a 105MHz-center-frequency repeater filter were employed for experiments and theoretical analysis. In this paper, the optical metrology providing visual energy distribution and real time inspection for surface acoustic wave is proposed for development of high quality multi-service and multi-frequency RF module.

Key Words : Surface acoustic wave, Visualization, interference, Diffraction, Real time, RF device

1. 서론

고체 표면을 전파하는 표면탄성파(SAW, surface acoustic wave)를 이용한 전기신호 처리는 1965년 White와 Voltmer에 의해 IDT(interdigital transducer)를 압전 물질 위에 형성하는 기술이 도입되면서 실용화되었고 이후 무선통신산업 등에서 다양한 형태로 발달을 거듭해 왔다 [1-3]. 표면탄성파 소자의 속도변환인자는 $\sim 10^5$ 정도인데 예를 들어, 전자기파의 주파수가 1GHz일 때 자유공간에서의 파장은 0.3m 정도이지만 표면탄성파로 변환될 경우 속도는 3×10^3 m/s로 감소하고 파장은 $\sim 3 \times 10^{-6}$ m 정도로 줄어들어 집적화된 고체소자로 전자기파를 다룰 수 있다 [4]. 표면탄성파를 이용한 고체소자는 통상 리소그래피의

한 두 공정만으로 제작이 가능하고, 가격 경쟁력과 대량 생산의 장점을 가지고 있어, 집적화 기술의 발달과 무선 통신의 수요가 증가하면서 무선 LAN이나 블루투스과 같은 단거리 무선 통신서비스를 제공하는 수 GHz대의 주파수 영역에서 활용성이 높아지고 있다. 최근 이동통신의 세대별 서비스 이동이 가속화되면서 여러 주파수의 서비스를 하나의 표면탄성파 모듈 내에서 동시에 수행해야 하는 경우가 발생하고 있는데 이 경우 서로의 주파수 대역에 잡음 발생 등의 영향을 최소화하면서 높은 서비스 품질을 유지하기 위해 다양한 구조 설계와 성능 평가에 대한 기술력 경쟁이 뜨거워지고 있다[5].

표면탄성파 소자의 성능 검사는 주로 전기적인 신호를 인가하였을 때 응답 신호를 보고 소자의 적정한 동작 유

*교신저자 : 장원권(jwk@hanseo.ac.kr)

접수일 10년 07월 07일

수정일 10년 08월 04일

게재확정일 10년 09월 08일

무를 판단하게 되는데 이 경우 단순히 표면탄성과 소자의 주파수 응답 스펙트럼을 보고 판단하게 되므로 설계의 구조적 특성과 표면 탄성파의 공간적 형성 형태를 파악하기는 어렵다. 고체 표면에서 발생하는 미세한 진동을 광학적인 방법으로 측정하기 위한 시도는 레이저가 처음으로 출현한 1960년대부터 있어왔으며, 회절격자를 이용하는 방법과 간섭을 이용하는 방법 외에 knife-edge 방식 등이 소개되었고, 정전 프로브를 이용하는 방법 등 다양한 연구가 있어왔다[6-8]. 광학적 방법을 이용한 측정은 표면탄성파의 진폭이나 위상을 위치나 주파수의 함수로 나타내는 것이다. 전기적인 측정 방법에 비해 광학적 측정 방법의 장점은 매우 높은 측정 감도와 표면탄성파의 진동을 가시화할 수 있다는 것이다. 광학적 방법의 측정 감도는 매우 우수하여 레이저 출력을 특정 위치에 집광하면 그 위치에서 대략 $10^{-11} \sim 10^{-8}$ m 정도의 표면탄성파 진동을 측정할 수 있으며, 경우에 따라서는 매우 약한 2차 신호($\sim 10^{-12}$ m)를 측정할 경우도 있는데 이것은 상온에서 알루미늄 원자의 열적 진동($\sim 10^{-11}$ m)과 비교될 정도이다[9].

주로 단일 주파수 대역에서 공진기, 필터, 지연선(delay line) 등으로 무선 통신에 이용되어오던 표면탄성파 소자는 소품종 대량생산에 주력하면서 주로 전기적인 검사방식에 의존하여 왔다. 기술력 경쟁은 주로 깨끗한 주파수 특성을 갖게 하는 것이었으나 최근 2~3세대에 이르기까지 다양한 서비스가 동시에 제공되면서 하나의 중계기나 단말기에 여러 주파수를 동시에 구현하는 것이 필요해지면서 다양한 설계 구조에서 이웃한 단위모듈에 미치는 영향을 가시화하는 기술이 필요하게 되었다.

본 연구에서는 레이저 간섭과 회절을 이용하여 제작된 표면탄성파 소자의 표면에서의 진동을 가시화하는 기술을 적용하여 RF 신호가 주어졌을 때와 주어지지 않았을 때의 광 신호 차이를 구별하고 분석하여 표면탄성파의 공간적 에너지 분포를 파악할 수 있게 하였다.

2. 측정 한계

공간 분해능은 집광된 레이저 광의 크기에 의해 결정된다. TEM₀₀ 모드의 가우시안 분포를 갖는 레이저 빔을 집광하였을 때 도달할 수 있는 최소 집광단면적의 직경 ω 는 광축에서의 광 세기의 $1/e^2$ 이 되는 지점사이의 거리이며

$$\omega = \frac{4\lambda f}{\pi d} = \frac{2\lambda}{\pi NA} \quad (1)$$

이다 [10]. λ 는 레이저 광의 파장, f 는 집광렌즈의 초점

거리, d 는 집광되기 전 렌즈에서의 레이저 빔의 직경, NA 는 개구수(numerical aperture)이다. 집광된 레이저 빔의 직경은 레이저를 이용하여 측정할 수 있는 한계와 관련이 있는데 집광된 레이저 빔의 직경 ω 는 측정하고자 하는 표면탄성파의 파장의 1/2보다 작아야 한다. 본 연구에서는 단일모드 He-Ne 레이저를 사용하고($\lambda=6.33 \times 10^{-7}$ m) 개구수가 0.55인 렌즈로 집광하였으므로 ω 는 약 7.3×10^{-7} m 정도가 된다. 이 경우 압전(piezoelectric) 물질로 사용되는 LiTaO₃, LiNbO₃, SiO₂ 등의 표면에 형성되는 탄성파의 파장은 약 1.5×10^{-6} m보다 길어야 하며 이는 이론적으로 표면탄성파의 주파수가 2.7GHz 이하여야 한다.

진폭 변화에 의한 최대의 공간 분해능을 얻기 위해서 표면 탄성파가 형성된 소자의 표면에 조사되는 입사빔과 반사되어 측정되는 빔 사이의 위상차는 $\pi/2 + n\pi$ 가 되어야 하는데 광 정렬이 정확하지 않을 경우 광 감지기에 도달하는 광선 사이의 위상차에 의한 오신호로 인해 측정 감도가 감소될 수 있다. 또한 표면탄성파가 형성된 소자의 표면에서 입사광의 반사율이 낮을 경우 기준 광에 비해 반사광의 세기가 약하므로 간섭에 의한 광 신호가 약해질 수 있다.

또한 레이저를 이용한 표면탄성파 측정에 있어서 측정 장치의 감도(sensitivity)는 가장 중요한 조건인데 Scruby와 Drain에 의해 제안된 측정 가능한 최소 표면 진동의 크기 A_{\min} 은

$$A_{\min} = \frac{1}{4} \omega \left(\frac{h\nu\Delta f}{\eta P} \right)^{1/2} \quad (2)$$

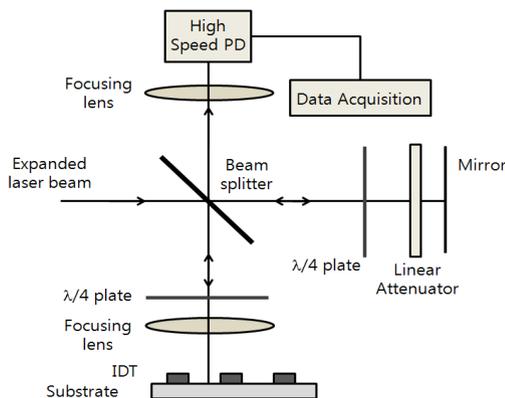
로 주어진다 [11]. 본 연구에서의 조건을 식에 대입하면 ω 는 7.3×10^{-7} m, $h\nu$ 는 입사광자 에너지로 3.14×10^{-19} J, η 는 레이저 파장에서 광 감지기의 양자효율로 약 0.5, P 는 레이저 출력으로 5×10^{-3} W이므로 A_{\min} 은 $2.75 \times 10^{-15} \sqrt{\Delta f}$ m가 된다. 본 연구에서 사용된 광 감지기의 대역폭 Δf 는 1.5 GHz이므로 측정 가능한 최소 표면 진동의 크기는 1.06×10^{-10} m 정도가 된다. 일반적으로 표면탄성파 소자의 전극 사이 압전 물질 표면에 형성되는 표면탄성파의 진동의 크기는 최소 1×10^{-10} m에서 최대 1×10^{-9} m 정도이므로 본 연구에서 사용된 측정 장치는 적합한 범위에 속한다.

3. 표면 탄성파의 진동 측정

앞서 소개한 바와 같이 표면 탄성파를 측정하기 위한 광학적 방법에는 간섭, 회절과 반사의 편향을 이용하는

방법 등이 있으며 광원으로는 대개 단일 모드 단색광원으로 레이저를 이용한다. 본 연구에서는 간섭에 의한 표면탄성과 측정을 시도하였다.

그림 1은 표면탄성과를 측정하기 위한 레이저 간섭을 이용한 측정 실험 장치와 간섭무늬의 측정 원리를 나타낸 것이다. TEM₀₀ 모드의 단일 모드 He-Ne 레이저로부터의 출력은 빔 확대기를 이용하여 확대된 후 편광 분리기(Polarization beam splitter)에 의해 50%씩의 광 출력으로 나뉜 레이저 빔은 각각 거울과 표면탄성과 소자의 표면에 반사되어 돌아와 다시 겹치면서 광 감지기에 이르러 간섭무늬를 나타낸다. 빔 확대기에 의해 확대된 레이저 빔은 편광 분리기에 의해 나뉜 후 각각 λ/4-판을 지나면서 편광 방향이 45°씩 회전하게 되므로 거울이나 소자의 표면에 반사된 후 다시 λ/4-판을 지날 때 또한 45° 회전하여 처음 편광 분리기에서 나뉜 때와는 각각 90°만큼 편광방향이 바뀐 상태로 투과 혹은 반사하면서 겹치게 된다. 표면탄성과 소자의 기판으로 사용된 압전 물질 표면에서의 반사는 거울에서의 반사되는 광의 양보다 적으므로 간섭무늬가 잘 보이지 않게 되는데 이를 균등한 광의 세기로 조절하기 위하여 거울에서 반사되는 레이저 빔은 광 감쇄기를 통과하도록 하여 두 개의 빔이 적절한 광세기를 가지도록 하였다. IDT 사이의 간격은 8×10⁻⁵ m로 집광된 레이저 빔의 크기에 비해 훨씬 적으나 집광렌즈의 초점거리가 짧고 레이저 출력에 의한 반사로 IDT사이의 중심에 레이저 광을 집광시키는 것은 쉽지 않으므로 표면 탄성과 소자를 미세 조정기 위에 고정하고 위치를 조절하며 측정하였다.



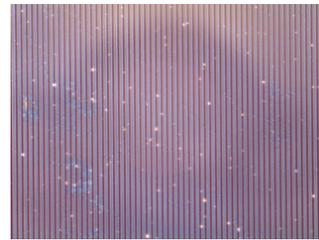
[그림 1] 표면탄성과를 측정하기 위한 실험 장치

그림 2는 측정에 사용된 표면탄성과 소자의 (a) 현미경 사진과 (b) 주파수 응답 스펙트럼을 나타낸 것으로 측정에 사용된 증계기 필터의 IDT 사이의 간격은 ~8×10⁻⁵

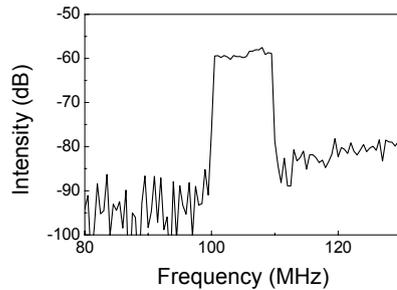
m이고 중심 주파수는 105MHz, 대역 폭은 ~10MHz이다. 현미경 사진은 1200배 확대된 것이며, 주파수 응답 특성은 30dB입력에서 네트워크 분석기를 이용하여 측정된 것이다.

그림 3은 RF신호를 인가하지 않았을 때의 간섭무늬로부터 얻은 값과 RF 신호를 인가하였을 경우의 간섭무늬를 비교한 것이다. 간섭계에서 입사광의 세기에 대한 반사광 세기의 비는

$$\frac{I_r}{I_i} = \frac{F \sin^2(\delta/2)}{1 + F \sin^2(\delta/2)} \quad (3)$$

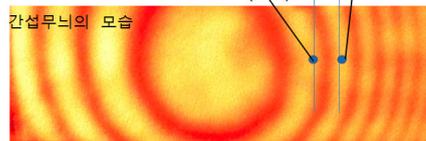
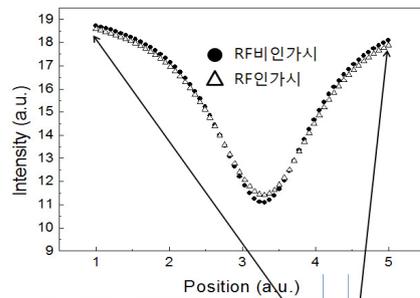


(a)



(b)

[그림 2] 증계기 필터의 (a) 현미경 사진, (b) 주파수 응답 특성



[그림 3] RF 신호를 인가하였을 때와 인가하지 않았을 때의 간섭무늬 비교

이며, F (finess)는 간섭무늬의 예리한 정도를 나타내는 것으로

$$F \equiv \left(\frac{2r}{1-r^2} \right)^2 \quad (4)$$

이다. r 은 반사계수, δ 는 광경로 차이다.

그림 3에서 아래 그림은 간섭무늬를 나타낸 것이고 위의 그래프는 RF신호를 인가하였을 때와 인가하지 않았을 때의 간섭무늬에 대해 광 감지기 위치에서 광축에 대해 수직방향으로 위치를 이동하며 측정한 결과를 나타낸 것이다. 위의 그래프에서 RF신호를 인가할 경우 위치별 광 신호 세기의 변화가 RF 신호를 인가하지 않았을 때보다 작아지는 것을 알 수 있다. 이것은 간섭 신호의 밝고 어두운 부분의 광 세기의 차이로 나타나는 간섭 무늬의 예리한 정도를 나타내는 F 가 RF신호를 인가하였을 때 작아지기 때문이다. 이것은 RF신호를 인가하였을 때 압전 물질의 표면에 형성되는 표면 탄성과 때문에 입사광에 대한 반사광의 세기가 감소하기 때문이다. 같은 이유로 화살표로 표시한 양 끝의 광 세기도 감소하는 것을 알 수 있다.

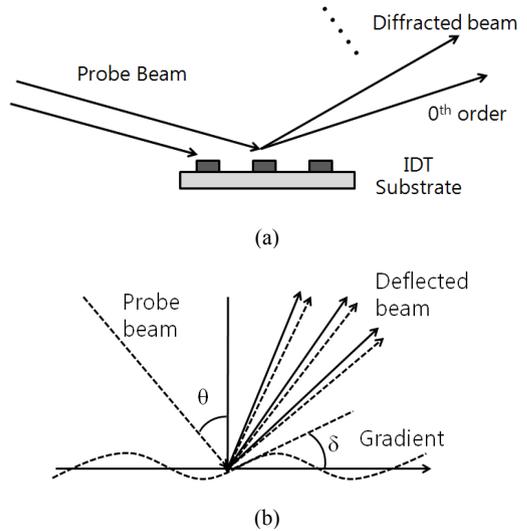
표면탄성과 소자에 RF 신호가 인가되었을 때 시각적으로 표면탄성과의 형성을 확인하는 방법은 간섭 외에 회절을 이용하는 방법이 있다. 길쭉하고 규칙적인 전극의 배열을 가지고 있는 표면탄성과 소자는 회절격자와 같은 구조를 가지고 있으며, 압전 소자 표면에 형성되는 표면탄성과는 레이저 광의 반사각을 편향시킨다.

그림 4는 회절과 편향에 의한 효과를 측정하는 원리를 나타낸 것이다. 레이저 프로브 빔을 표면탄성과 소자의 표면에 비스듬히 입사하면 격자 구조를 가지고 있는 표면탄성과 소자의 표면에 형성된 IDT에 의해 회절이 발생한다. 이 때 일부 레이저 광은 금속인 IDT의 표면에서 반사되지만 일부는 기판으로 쓰인 압전소자의 표면에서 반사된 후 회절하게 된다. 거울에서 반사될 때와 마찬가지로 입사각과 반사각이 같은 0차 광이 가장 강하게 측정되며 격자 간격과 입사광의 파장에 따라 정해지는 회절각으로 회절광이 발생한다.

$$d \sin \theta = n \lambda \quad (5)$$

d 는 회절 격자의 간격, θ 는 입사각, λ 는 입사광의 파장이며, n 은 회절광의 차수를 나타낸다.

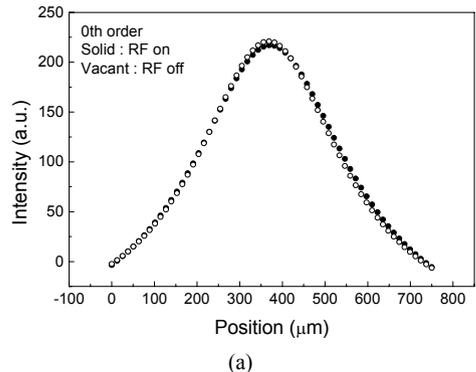
압전 소자의 표면에 반사될 때 표면탄성과 소자에 RF 신호가 인가되면 그림 4(b)와 같이 표면 탄성과의 기울기 (gradient), δ 에 의해 편향이 발생하고 이것은 회절된 레이저광의 편향으로 나타난다.

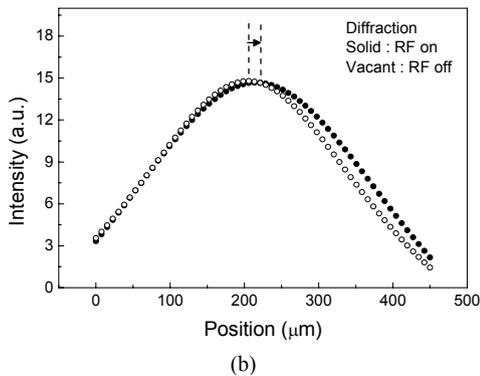


[그림 4] (a) 회절에 의한 효과, (b) 표면탄성과의 기울기에 의한 편향효과

그림 5는 표면탄성과 소자의 표면에 레이저 광을 비스듬히 입사하였을 때 (a) 입사각과 같은 반사각에서 측정한 광신호와 (b) 회절각에서 측정한 광신호를 측정한 결과를 나타낸 것이다. 가장 강한 광신호는 입사각과 같은 반사각에서 측정하였을 때 나타나는데 (a)에 측정결과를 보인 것처럼 RF신호를 인가하였을 때와 인가하지 않았을 때의 광신호의 차이가 거의 나타나지 않았다. 그러나 (b)에 측정 결과는 1차 회절 결과를 나타낸 것으로 RF 신호를 인가하였을 때와 인가하지 않았을 때의 광신호의 세기와 위치가 다른 것을 알 수 있다.

이것은 그림 4(b)에 나타낸 것과 같이 압전 소자의 표면에 형성된 표면탄성과의 기울기 때문이다. 입사각과 반사각이 같은 경우에는 편향효과가 그리 크게 나타나지 않았는데 이것은 대부분의 레이저 광이 입사광과 같은 반사각으로 반사되어 편향에 의한 효과가 크지 않기 때문이다.





[그림 5] 표면탄성과 소자의 표면에 레이저 광을 비스듬히 입사하였을 때 (a) 입사광과 같은 반사각에서 측정된 광신호, (b) 회절각에서 측정된 광신호.

4. 결론

최근 이동통신의 세대간 이동이 빠르게 진행되고 다양한 서비스를 하나의 모듈에 구성하는 다중주파수대역(multiband)필터에 대한 수요가 증가하면서 RF 필터의 고품질화 및 다기능화가 기업의 기술경쟁력을 결정하는 주요요인으로 인식되고 있다. RF 필터인 SAW filter는 좁은 간격의 전극을 가지고 있으며 표면탄성과의 중방향 진행을 통해 공진을 하는 구조이므로 간섭계(interferometer)에 의해 광세기의 분포를 시각적으로 나타내는 기술은 이웃한 다른 서비스 모듈의 동작에 의한 영향을 실시간으로 공간적 위치를 확인할 수 있게 하여 다기능 복합 모듈의 설계와 성능 평가에 매우 적절하고 실용적이다. 본 논문에서는 레이저 간섭과 회절을 이용하여 다중 서비스를 제공하는 표면탄성과 소자의 경우 이웃한 다른 주파수 대역의 모듈에 의해 서로 영향을 주어 발생하는 간섭과 방해를 시각적으로 판단하는 기술을 제시하였다.

본 연구에서 제시한 표면 탄성과의 형성을 위치별로 시각적으로 확인하는 광학적 방법은 다기능 서비스를 제공하는 복합 모듈에서 IDT의 전극 배치나 표면 탄성과 흡수대(absorber)와 격리대(isolator)의 적절한 배치와 구조를 분석하는데 매우 유용할 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] R. M. White and F. W. Voltmer, "Direct piezoelectric coupling to surface elastic waves", Appl. Phys. Lett.,

Vol. 7, pp. 314-316, 1965.

- [2] J. V. Knuutila, P. T. Tikka, M. M. Salomaa, "Scanning michelson interferometer for imaging surface acoustic wave fields", Opt. Lett., Vol. 25, No. 9, pp. 613-615, 2000.
- [3] M. Lewis, "SAW and optical signal processing", Proc. IEEE Ultrasonics Symp., pp. 809, 2005.
- [4] G. S. Kino, *Acoustic Waves: Devices, Imaging, and Analog Signal Processing*, Prentice-Hall Inc., NJ, 2000.
- [5] 전자부품연구원 전자정보센터, "국내 SAW필터의 최신 기술 및 시장 동향 분석", 2009.
- [6] B. A. Richardson and G. S. Kino, "Probing of elastic surface waves in piezoelectric media", Appl. Phys. Lett., Vol. 16, pp. 82-84, 1970.
- [7] 안성준, 오태식, 안승준, "되먹임 회로로 제어하는 Michelson 레이저 간섭계를 이용한 Nano-scale 미세변위 측정", 한국산학기술학회지, Vol. 8, No. 5, pp. 1007-1012, 2007.
- [8] 장원권, "저전압 초소형 전자 칼럼에서 이중 편향기의 효과", 한국산학기술학회지, Vol. 10, No. 10, pp. 2628-2633, 2009.
- [9] B. W. Busch and T. Gustasson, "Thermal expansion and mean-square displacements of the Al(110) surface studied with medium-energy ion scattering", Phys. Rev. Vol. B61, pp. 16097-16104, 2000.
- [10] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, Pergamon Press, 1980.
- [11] C. B. Scruby and L. E. Drain, *Laser Ultrasonics*, Adam Hilger, 1990.

박 준 오(Jun-Oh Park)

[준회원]



- 2010년 2월 : 한서대학교 컴퓨터 응용물리학과 졸업 (이학사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 대학원 광공학과 석사과정

<관심분야>

광학설계, 광분석, 레이저광학

장 원 권(Won Kweon Jang)

[정회원]



- 1994년 8월 : 인하대학교 (이학 박사)
- 1997년 8월 ~ 1998년 8월 : 미국 CREOL/UCF 방문연구원
- 2001년 6월 ~ 2002년 2월 : 일본 분자과학연구소 초빙교수
- 1995년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 전자컴퓨터통신학부 교수

<관심분야>

응용광학, 레이저광학