

누름가공과 AAO 공정을 이용한 나노-마이크로 복합패턴 제작방법 연구

A Study on Manufacturing Method of Nano-Micro Hybrid Pattern Using Indentation Machining Method and AAO Process

김한희¹, 전은채^{1,2,✉}, 최대희¹, 장웅기³, 박용민³, 제태진^{1,2}, 최두선^{1,2}, 김병희³, 서영호³
Han-Hee Kim¹, Eun-chae Jeon^{1,2,✉}, Dae-Hee Choi¹, Woong-Ki Jang³, Yong-Min Park³,
Tae-Jin Je^{1,2}, Doo-Sun Choi^{1,2}, Byeong-Hee Kim³, and Young-Ho Seo³

1 한국기계연구원 나노공정연구소 (Department of NanoManufacturing Technology, Korea Institute of Machinery and Materials)

2 과학기술연합대학원대학교 나노메카트로닉스 전공 (Department of NanoMechatronics, University of Science and Technology)

3 강원대학교 기계메카트로닉스 공학과 (Department of Mechanical and Mechatronics Engineering, Kangwon National University)

✉ Corresponding author: jeonec@kimm.re.kr, Tel: +82-42-868-7055

Manuscript received: 2014.7.11 / Revised: 2014.9.3 / Accepted: 2014.10.22

Micro/nano patterns for optical concentration and diffusion have been studied in the various fields such as displays, optics, and sensors. Conventional micro patterns were continuous and linear shapes due to using linear-type light sources, however, recently non-continuous patterns have been applied as point sources are used for dot-type light sources such as LEDs and OLEDs. In this study, a hybrid machining technology combining an indentation machining method and an AAO process was developed for manufacturing the non-continuous micro patterns having nano patterns. First, mirror-like surfaces ($R_a < 20\text{nm}$) of pure Aluminum substrates were obtained by optimizing cutting conditions. Then, The letter of 'K' consisting of the arrays of the micro patterns was manufactured by the indentation machining method which has a similar principle to indentation hardness testing. Finally, nano patterns were machined by AAO process on the micro patterns. Conclusively, a specific letter having nano-micro hybrid patterns was manufactured in this study.

Key Words: Indentation machining method (누름가공), Anodic aluminum oxide (알루미늄 양극산화), Micro pattern (마이크로 패턴), Nano-micro hybrid pattern (나노-마이크로 복합패턴)

1. 서론

최근 디스플레이, 광학, 바이오, 센서 등 다양한 산업에서 마이크로 및 나노 패턴에 대한 연구가 진행되고 있다. 특히 디스플레이 및 광학분야

에서 마이크로 및 나노 패턴과 나노-마이크로 복합패턴에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 기존 마이크로 패턴에 대한 연구는 광학적 효율 향상을 위한 프리즘 패턴이나 렌티큘러 패턴 등으로 연속적인 패턴 중심이며 양산에 적용되어 제품

에 사용되고 있다. 그러나 다양한 광원의 발전으로 연속적인 패턴이 아닌 마이크로렌즈어레이 같은 비연속적인 패턴이 필요하게 되었으며, 최근 연구들에서도 비연속적인 마이크로 패턴의 광학적 효과와 광 효율 향상이 검증되고 있다.^{1,5} 그러나 비연속적인 마이크로 패턴의 제작은 화학적 방법이나 DTM(Diamond Turning Machine) 등을 이용하는 복잡한 공정으로 양산화가 힘들고 형상이 제한적이라는 단점이 있다.

나노 패턴의 연구는 바이오, 센서, 광학 등의 다양한 분야에서 이루어 지고 있으며, 고감도의 센서 제작이나 고해상도 등 첨단 기술에 적용이 되고 있다.^{6,7} 최근에는 인위적인 나노 구조물을 이용해 빛의 굴절을 통해 색을 표현할 수 있는 구조색에 대한 연구가 진행되고 있다. 이러한 구조색은 색소가 필요 없이 영구적으로 색을 표현할 수 있기 때문에 위조방지 등에서 많은 연구가 이루어지고 있다.⁸⁻¹¹ 그러나 인위적인 나노 구조물을 만드는 공정이 복잡하고 생산성이 떨어지는 단점을 가지고 있다. 또한 한번의 공정으로 전면적에 일정한 크기의 나노 패턴만을 제작할 수 있기 때문에 특정한 형상이나 로고를 가지는 구조색을 표현하기 어렵다는 단점을 가지고 있다. 만약 특정한 형상이나 로고에만 구조색을 나타낸다면 최근 전세계적으로 문제가 되는 위조제품 적발에 큰 도움이 될 수 있다. 현재 홀로그래프를 이용한 위조방지 기술이 널리 사용되고 있으나, 홀로그래프 복제가 비교적 용이하여 제작이 어려운 새로운 위조방지 기술이 필요하다. 이에 본 연구에서는 단순하고 생산성을 고려한 기계적가공(누름가공)을 이용해 마이크로 패턴을 가지는 특정한 형상이나 로고를 제작하고, 제작된 마이크로 패턴에 비교적 단순하고 나노 패턴의 크기 제어가 가능한 AAO(Anodic Aluminum Oxide)공정을 이용해 새로운 나노-마이크로 복합패턴 제작 공정을 연구하고, 특정한 형상이나 로고를 가지는 나노-마이크로 복합패턴 제작을 실시하였다.

2. 나노-마이크로 복합패턴 제작 방법

광학분야에서 비연속적인 마이크로 패턴을 이용한 광 확산 및 광 효율 향상에 대한 효과가 입증되었으나, 연속적인 마이크로 패턴과 다르게 제작 공정이 복잡하고 형상이 제한적인 단점이 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해 본 연구에서는 비커

스 경도 시험과 마찬가지로 다양한 형태의 압입자를 이용해 하중을 인가하는 마이크로 누름가공 공정을 이용하였다. 기존의 연속적인 마이크로 패턴을 제작할 수 있는 정밀 기계장비에 Z축 액츄에이터(캠축 및 솔레노이드)를 추가해서 비연속적인 패턴 제작이 가능하다. 이와 같은 마이크로 누름가공 공정은 사용되는 공구의 형상에 따라서 마이크로 패턴의 형상이 결정되어 형상 제한이 자유롭다. 본 연구에서 개발된 마이크로 누름가공 공정은 각각의 점패턴을 좌표(X, Y)로 제어할 수 있기 때문에 2차원에서 표현할 수 있는 형상이나 로고 등(마이크로 점패턴으로 이루어진)을 제작할 수 있다. 또한 마이크로 누름가공 공정을 이용하면 금형소재에 직접 가공할 수 있기 때문에 생산성을 향상시킬 수 있다.

이러한 마이크로 누름가공 공정을 이용해 특정한 형상이나 로고 등이 제작된 비연속적인 마이크로 패턴에 나노 패턴을 제작하기 위해 비교적 단순하고 나노 패턴의 크기 제어가 가능한 AAO 공정을 적용하였다. AAO 공정을 위해 Pure aluminum (99.999% Aluminum)을 금형 소재로 선택하였다. Pure aluminum은 연질이기 때문에 고압을 사용하는 사출성형에는 적용이 어려울 수 있으나 비교적 저압에서 성형하는 Hot embossing이나 UV embossing에는 사용할 수 있다. 이러한 장점을 이용해 본 연구에서는 기계적 가공 방법인 누름가공을 이용해 특정한 형상이나 로고를 제작한 후 AAO공정을 이용해 공정을 진행하여 나노-마이크로 복합패턴을 제작할 수 있는 공정을 제안하였다. 이러한 공정을 이용하여 공정을 최소한으로 단순화 하고 생산성을 높일 수 있었으며 단일 소재에서 나노-마이크로 복합패턴을 제작할 수 있었다.

3. 누름가공을 이용한 마이크로 패턴 제작

3.1 마이크로 패턴 가공장비

누름가공을 이용해 마이크로 패턴을 가지는 특정한 형상이나 로고를 제작하기 위해 사용된 정밀 가공장비는 Fig. 1과 같이 장비에서 공구의 교체만으로 정밀 평삭가공 및 정밀 누름가공이 가능하도록 설계되었다. 먼저, X, Y, Z축의 3축과 Diamond cutting tool을 이용해 정밀 평삭 가공이 가능하며, 평삭가공이 끝난 후 Z축에 Cam축 및 Solenoid actuator를 추가로 설치해 편심각도 및 인가전압에 따라서 수~수백마이크로 정밀 누름가공이 가능하

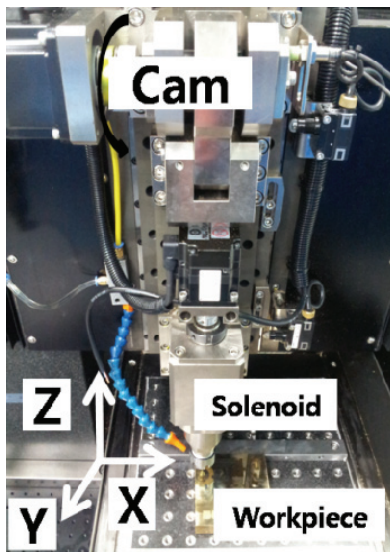
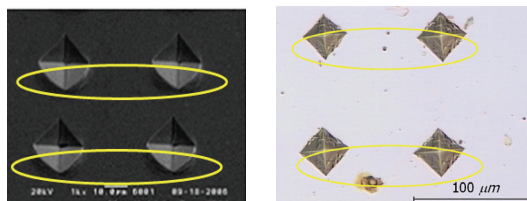


Fig. 1 Hybrid machining system for micro indentation machining and ultra-fine planning



(a) With interference error (b) Without interference error

Fig. 2 Comparison of micro patterns depending on interference error

도록 하였다. 본 연구에서 사용한 Solenoid actuator의 누르는 힘은 1N 내외이다. 가공장비는 X, Y, Z 축의 직선 정밀도 0.3 μ m 이하, 각축의 분해능 3nm 성능을 가지고 있으며, 최대 가공면적은 200mm x 200mm이다. 고속으로 누름가공을 실시하면 Fig. 2(a)와 같이 공구와 스테이지 간의 간섭현상이 발생하여 패턴 형상이 한쪽으로 늘어나는 현상이 발생할 수 있다. 이러한 간섭은 누름가공 중에 스테이지가 움직이기 때문에 발생하기 때문에 누름가공 시 스테이지는 완전히 정지하도록 구동 프로그램을 제작하였고, 실제 구동을 통해 약 5Hz의 속도로 누름가공 시 Fig. 2(b)와 같이 간섭현상이 없어서 패턴 형상에 늘어난 모양이 없는 비연속적인 마이크로 패턴을 제작하도록 하였다. 이처럼 개발된 장비를 이용하여 정밀평삭 및 간섭현상이 없는 정밀 누름가공이 가능하다.



(a) The 64 brass cutting conditions



(b) The optimized cutting conditions

Fig. 3 Machined surfaces of pure Al molds depending on cutting conditions

3.2 연질재료(순알루미늄) 경면가공

일반적으로 기계적 가공에서 사용되는 소재는 경질의 특성을 가지는 금속재료이다. 그러나 본 연구에서 나노패턴을 제작하기 위한 방법으로 AAO공정을 이용하기 때문에 순알루미늄에 마이크로 패턴을 제작해야 한다. 또한 AAO 공정을 이용해 일정한 크기의 나노패턴 제작을 실시하기 위해서는 나노급의 표면조도를 가지는 경면가공이 필요하다. 그러나 순알루미늄의 경우 일반적으로 사용되는 금형소재보다 연질이기 때문에 기계적 가공 시 최적의 가공조건 선정이 중요하다. 순알루미늄의 최적의 가공조건을 선정하기 위해 마이크로패턴 가공장비에 공구반경 50mm의 다이아몬드 톨을 이용해 가공 실험을 실시하였다. 기존연구¹²에서 6:4황동 금형에 사용된 경면가공조건인 Feed rate 350mm/min 이하의 가공속도와 최대 가공깊이 10 μ m 이하로 황삭, 중삭, 정삭으로 나누어 가공을 실시하였다. 그러나 이러한 가공조건을 이용해 연질재료인 순알루미늄을 가공한 결과 Fig. 3(a)와 같이 경면이 얻어지지 않았고 표면조도는 약 100nm

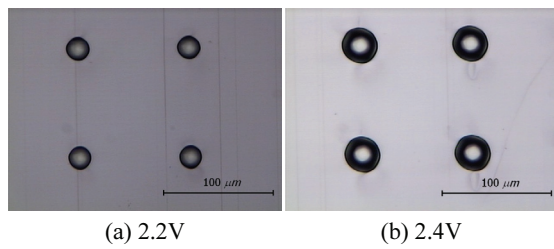


Fig. 4 Machined micro patterns by various input voltages

로 나타났다. 이러한 결과는 연질재료를 가공 시 발생하는 칩의 배출이 잘 안되기 때문에 가공 면의 스크래치가 발생하여 표면조도 저하를 야기하는 것으로 생각된다. 이러한 칩의 배출 문제를 해결하기 위해 가공속도를 Feed rate 500mm/min으로 향상시키고 가공깊이를 황삭, 중삭, 정삭으로 나누어 가공하지 않고 가공깊이 35μm의 단일 가공만으로 가공하였다. 그 결과 Fig. 3(b)와 같이 일반적인 금형소재 가공에서 나타나는 경면을 가공할 수 있었으며, 표면조도도 20nm 이하로 측정되었다.

3.3 인가전압 별 누름가공 실험

평삭 가공을 이용해 경면가공이 끝난 시편에 동일한 장비로 누름가공을 이용해 마이크로 패턴을 가공하였다. 누름가공에 사용된 Solenoid actuator의 인가전압 별 마이크로 패턴의 크기를 알아보기 위해 전압을 2.2V~3.0V까지 0.2V씩 상승시켜 가공을 진행하였다. 인가전압 별 누름가공 실험은 피치 100μm를 가지는 9×9 어레이 마이크로 패턴으로 선정하였다. 마이크로 패턴 가공을 위해 사용된 공구는 공구반경 25μm의 구형 다이아몬드 공구이다. 인가전압 별로 마이크로 패턴을 가공한 후 광학현미경을 이용해 각 위치별로 8개 패턴들의 지름을 측정하였다. 가공된 마이크로 패턴은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 일정 간격으로 공구와 스테이지 간의 간섭현상 없이 가공되었다. 마이크로 패턴의 평균 지름은 Fig. 5에 나타난 바와 같이 인가전압이 증가함에 따라 증가하였으며 2.2V에서 21.37μm에서 시작하여 3.0V에서 56.01μm로 측정되었다. 각 인가전압 별로 측정된 지름의 표준편차는 대체로 0.6μm 내외(예를 들어 2.2V에서 0.6038μm)였으며, 3.0V에서 가장 높은 0.9029μm로 계산되어 매우 높은 재현성을 나타내었다. 이를 통해 마이크로 패턴 가공 장비의 Solenoid actuator의 인가전압을 변화시켜 마이크로 패턴 크기를 제어할 수 있음을 확인하였다.

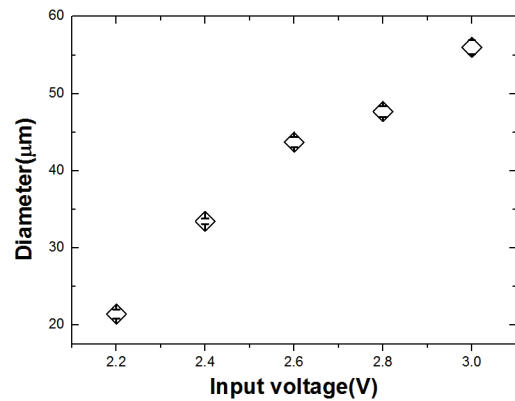


Fig. 5 Variation of diameter of micro patterns by input voltage

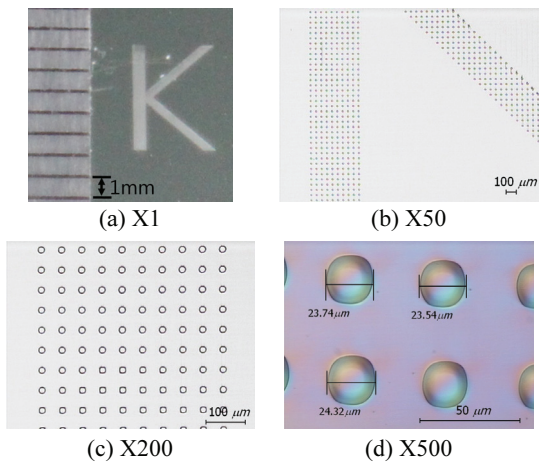


Fig. 6 Machined letter 'K' consisting of micro patterns

3.4 누름가공을 이용한 마이크로 패턴 로고 가공

기존 마이크로 패턴의 경우 대부분이 연속적인 패턴이기 때문에 LED 등의 점광원에는 적용하기 힘들고 비연속적인 특정한 형상이나 로고를 표현하기 어렵다. 이에 반해 누름가공 공정은 마이크로 패턴을 가지는 다양한 형상이나 로고 제작이 가능하다. 이를 검증하기 위하여 마이크로 패턴을 가지는 로고로 'K'의 가공을 실시하였다. 누름가공에 사용된 장비는 Fig. 1의 장비이며 인가전압은 2.4V로 고정하였다. 마이크로 패턴 간의 피치는 50μm로 선정하였다. 로고를 이루는 마이크로 패턴들의 X, Y의 좌표 값을 미리 계산하여 가공에 사용하였으며, 가공 속도는 약 5Hz로 실시하였다. 마이크로 패턴을 가지는 로고를 가공한 결과 Fig.

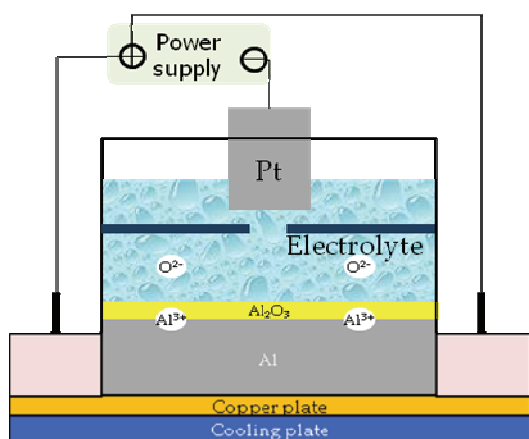


Fig. 7 A schematic diagram of AAO system

6(a)와 같이 겹으로 보았을 때는 일반 글자처럼 보였다. 그러나 가공된 글자를 광학현미경을 이용해 확대해보면 Fig. 6(b), (c), (d)와 같이 원형의 마이크로 패턴들의 집합체임을 알 수 있다. 또한 마이크로 패턴 간의 간격이 의도한 바와 같이 50 μ m로 측정되었다. 따라서 누름가공 공정을 통해 마이크로 패턴으로 이루어진 특정한 형상이나 로고를 제작할 수 있음을 확인하였다.

4. AAO를 이용한 나노-마이크로 복합패턴 제작

누름가공을 이용해 마이크로 패턴 제작을 완료한 시편에 대해 AAO공정을 진행하였다. 공정에 사용된 AAO장비는 Fig. 7에 나타내었다. 공정 조건은 먼저 증류수를 이용해 시편 세척을 실시하고, 1차 공정으로 전해액(인산 0.1M@-10 $^{\circ}$ C) 내에서 Passivation(전압: 20V) 공정과 Anodizing(전압: 200V) 공정을 진행하여 나노 패턴을 가공하였다. 2차 공정으로 크롬산을 이용해 2시간동안 알루미늄을 제거하였으며, 3차 공정으로 1차 공정과 동일한 조건 하에서 다시 나노 패턴을 가공하였다. 4차 공정으로 동일한 전해액에서 나노 패턴 크기를 키우는 공정을 진행하였으며, 마지막으로 초음파세척기를 이용해 시편 세척을 실시하였다.

AAO공정을 실시한 후 시편을 SEM을 이용해 측정을 실시한 결과 Fig. 8(a)와 같이 누름가공을 통해 제작된 마이크로 패턴의 형상은 유지되면서 나노 패턴이 제작된 것을 확인할 수 있었다. 마이크로 패턴을 확대해서 측정한 결과 Fig. 8(c)와 같이 지름 100~200nm의 나노홀들이 비교적 일정 크

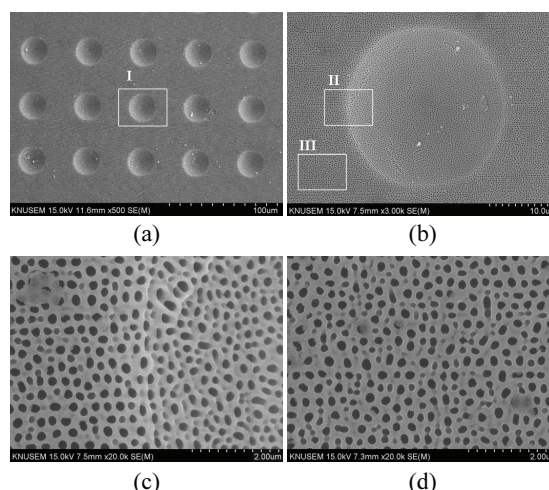


Fig. 8 Fabricated nano-micro hybrid patterns: (a) micropattern array, (b) enlarged view of region-I in Fig. 8(b), (c) Enlarged view of region-II in Fig. 8(b), (d) enlarged view of region-III in Fig. 8(b)

기로 균일하게 제작된 것을 볼 수 있다. Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)의 시편 표면에 마이크로 패턴 가공 없이 AAO 공정을 실시하였을 때 Fig. 3(b)에서만 Fig. 8과 유사한 나노홀이 형성되었다. 이를 통해 가공된 마이크로 패턴 표면의 조도도 우수한 것으로 유추하였다. 또한 나노홀의 생성 방향은 Fig. 8(d)에서 나타나듯이 평면에 수직방향으로 생성된 것이 아닌 마이크로 패턴의 표면을 따라 곡률의 수직방향으로 생성된 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 누름가공과 AAO공정을 이용하여 나노-마이크로 복합패턴을 제작할 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 누름가공과 AAO 공정을 융합하여 특정한 형상이나 로고로 인식될 수 있는 나노-마이크로 복합패턴을 제작하는 새로운 공정을 연구하였다. 이를 통해 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 나노-마이크로 복합패턴을 제작하기 위한 연결 소재인 순알루미늄의 경면 가공 조건 최적화를 통해 표면조도 20nm이하의 경면을 가공하였다.
- 2) 기계적 가공 방법인 누름가공법을 이용하여 크기 조절이 가능한 수십 마이크로 크기의 마이

- 크로 패턴을 가공하였으며, 2차원 배열을 통해 특정 형상이나 로고를 제작하였다.
- 3) 가공된 마이크로 패턴에 AAO 공정을 적용하여 마이크로 패턴 내부에 나노 패턴을 가공하였으며, 이를 통해 새로운 나노-마이크로 복합 패턴 가공기술을 개발하였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 “100nm ~ 100 μ m 나노복합구조물 응용제품 생산을 위한 금형가공 및 에너지 100%절감 성형시스템 개발” 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Zhou, S., Cao, B., Liu, S., and Ding, H., “Improved Light Extraction Efficiency of Gan-Based Leds with Patterned Sapphire Substrate and Patterned Ito,” *Optics & Laser Technology*, Vol. 44, No. 7, pp. 2302-2305, 2012.
- Pudis, D., Suslik, L., Skriniarova, J., Kovac, J., Kovac Jr, J., et al., “Effect of 2D Photonic Structure Patterned in the LED Surface on Emission Properties,” *Applied Surface Science*, Vol. 269, pp. 161-165, 2013.
- Jeong, S.-M., Kissinger, S., Kim, D.-W., Lee, S. J., and Kim, J.-S., “Characteristic Enhancement of the Blue LED Chip by the Growth and Fabrication on Patterned Sapphire (0 0 0 1) Substrate,” *J. of Crystal Growth*, Vol. 312, No. 2, pp. 258-262, 2010.
- Cho, J.-Y., Hong, S.-H., Byeon, K.-J., and Lee, H., “Light Extraction Efficiency Improvement in GaN-based Blue Light Emitting Diode with Two-Dimensional Nano-Cavity Structure,” *Thin Solid Films*, Vol. 521, pp. 115-118, 2012.
- Ee, Y.-K., Li, X.-H., Biser, J., Cao, W., Chan, H. M., and et al., “Abbreviated MOVPE nucleation of III-Nitride Light-Emitting Diodes on Nano-Patterned Sapphire,” *Journal of Crystal Growth*, Vol. 312, No. 8, pp. 1311-1315, 2010.
- Wu, G., Yen, C., Chien, H., Lu, H., Chang, T., and Nee, T., “Effects of Nano-Structured Photonic Crystals on Light Extraction Enhancement of Nitride Light-Emitting Diodes,” *Thin Solid Films*, Vol. 519, No. 15, pp. 5074-5077, 2011.
- Kim, S. H., Lee, K.-D., Kim, J.-Y., Kwon, M.-K., and Park, S.-J., “Fabrication of Photonic Crystal Structures on Light Emitting Diodes by Nanoimprint Lithography,” *Nanotechnology*, Vol. 18, No. 5, Paper No. 055306, 2007.
- Xu, T., Shi, H., Wu, Y. K., Kaplan, A. F., Ok, J. G., and Guo, L. J., “Structural Colors: From Plasmonic to Carbon Nanostructures,” *Small*, Vol. 7, No. 22, pp. 3128-3136, 2011.
- Barnes, W. L., Dereux, A., and Ebbesen, T. W., “Surface Plasmon Subwavelength Optics,” *Nature*, Vol. 424, No. 6950, pp. 824-830, 2003.
- Wang, X., Akahane, T., Orikasa, H., Kyotani, T., and Fu, Y., “Brilliant and Tunable Color of Carbon-Coated Thin Anodic Aluminum oxide Films,” *Applied physics letters*, Vol. 91, No. 1, Paper No. 011908, 2007.
- Lee, H.-S., Yoon, Y.-T., Lee, S.-s., Kim, S.-H., and Lee, K.-D., “Color Filter based on a Subwavelength Patterned Metal Grating,” *Optics express*, Vol. 15, No. 23, pp. 15457-15463, 2007.
- Park, E. S., Choi, H. J., Kim, H. H., Jeon, E. c., and Je, T. J., “Study on Machining High-Aspect Ratio Micro Barrier Rib Array Structures using Orthogonal Cutting Method,” *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 29, No. 12, pp. 1272-1218, 2012.