

극압 임프린트 리소그래피를 통한 자성고무 복합재 표면 미세 패터닝 기술

강은빈 · 김유나 · 박운익[†]

부경대학교 재료공학과

Surface Nano-to-Micro Patterning for Rubber Magnet Composite via Extreme Pressure Imprint Lithography

Eun Bin Kang, Yu Na Kim, and Woon Ik Park[†]

Department of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, 45, Yongso-ro, Busan, 48513, Republic of Korea

(Received July 9, 2024; Revised July 29, 2024; Accepted July 31, 2024)

초 록: 나노임프린트 리소그래피(Nanoimprint lithography, NIL)는 저렴한 공정비용으로 고해상도 패턴을 제조할 수 있는 장점을 가지고 있기 때문에 마이크로 크기부터 나노스케일까지 패턴을 형성하는데 많이 사용되고 있다. 그러나, 대부분의 NIL 공정 기술은 기본적으로 임프린트용 레지스트 사용이 필요하고, 자외선, 열과 같은 외적인 요소 또한 필요하기 때문에, 타겟 소재를 패터닝하기 위해서 식각공정 또는 금속 증착 등의 추가적인 후공정이 요구된다. 그리고, 유연 필름이나 굴곡이 있는 소재를 패터닝 하기에 어려움이 있다. 본 연구에서는, 유연한 자성고무 복합재(rubber magnet composite, RMC) 기판 표면에 마이크로/나노 수준의 패턴을 상온에서 식각 공정 없이 형성할 수 있는 극압 임프린트 리소그래피(extreme pressure imprint lithography, EPIL) 공정을 소개하고자 한다. EPIL 기술은 금속, 고분자, 세라믹과 같은 다양한 재료의 표면에 직접적이고 영구적인 변형을 통해 초미세 구조물을 대면적으로 형성할 수 있는 공정으로서, 본 연구에서는 RMC 필름에 적용하여 서브 마이크로 크기의 패턴 형성이 가능함을 보여준다. 우리는 스트론튬계 페라이트와 염소화폴리에틸렌으로 구성된 유연한 RMC 기판 표면에 마이크로/나노 스케일의 다양한 패턴 크기 및 형상을 갖는 균일한 구조물을 형성할 수 있는 공정 및 결과물을 보여주고자 한다. RMC 필름 표면 상 미세한 패턴구현이 가능한 EPIL 공정은 미세한 자기 방향의 변화 및 제어를 요구하는 첨단 전자기소자 부품 제조에 널리 적용될 수 있을 것으로 기대한다.

Abstract: Nanoimprint lithography (NIL) is widely used to form structures ranging from micro to nanoscale due to its advantage of generating high-resolution patterns at a low process cost. However, most NIL processes require the use of imprint resists and external elements such as ultraviolet light or heat, necessitating additional post-processes like etching or metal deposition to pattern the target material. Furthermore, patterning on flexible and/or non-planar films presents significant challenges. This study introduces an extreme pressure imprint lithography (EPIL) process that can form micro-/nano-scale patterns on the surface of a flexible rubber magnet composite (RMC) film at room temperature without an etching process. The EPIL technique can form ultrafine structures over large areas through the plastic deformation of various materials, including metals, polymers, and ceramics. In this study, we demonstrate the process and outcomes of creating a variety of periodic structures with diverse pattern sizes and shapes on the surface of a flexible RMC composed of strontium ferrite and chlorinated polyethylene. The EPIL process, which allows for the precise patterning on the surface of RMC materials, is expected to find broad applications in the production of advanced electromagnetic device components that require fine control and changes in magnetic orientation.

Keywords: Imprint lithography, Rubber magnetic composition, Nanostructure, Nanopatterning

1. 서 론

전 세계적인 화석자원의 고갈로 인해 1차적으로 탄소 배출을 줄이기 위한 “에너지 탈탄소화”가 많은 주목을 받고 있다.¹⁾ 탈탄소 에너지 시스템의 광범위한 발전은 특히

영구자석과 같은 고성능 자성재료의 수요를 불러왔다.²⁾ 최근에는 자성재료를 더욱 효율적으로 사용하기 위해서 고무 화합물과 자성 충전재를 결합한 고무자성 복합재 (rubber magnet composite, RMC)의 연구가 활발히 진행되어 왔다.³⁾ RMC는 고무와 자성재료의 종류 및 함량에 따

[†]Corresponding author
E-mail: thane0428@pknu.ac.kr

© 2024, 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.

라 자기강도, 감자 저항성, 기계적 강도, 탄성 및 유연성이 우수하여 전자기 흡수체, 전자기 센서와 같은 분야에 널리 응용되고 있다.^{4,6)} 예를 들어, 열가소성 천연고무 (Thermoplastic natural rubbers, TPNR)로 채워진 자철광 (Fe_3O_4) 나노 복합재를 사용하여 충전재의 두께와 조성에 따라 마이크로파 흡수 특성을 분석하여 흡수 대역폭을 제어할 수 있는 연구결과가 보고되었다.⁷⁾ 자성재료를 다중벽 탄소 나노 튜브(Multi-wall carbon nanotube, MWCNT)와 함께 폴리머 매트릭스 내에 패터닝하여 자기배열을 통해서 마찰전기 센서를 개발하는 연구결과가 보고되었다.⁸⁾ 최근에는, 나노 패터닝이 있는 폴리머 기반 자기 기계 마찰전기 나노발전기(MMTENG)를 제작하여 자기장 안에서 출력 성능을 시험한 결과 높아진 마찰전기 및 정전기로 높은 출력 전력을 얻어 IoT 시스템에 적용하는 연구사례가 보고되었다.⁹⁾ 이와 같이, 다양한 전자기적 연구에 마이크로/나노 패터닝을 활용한 형상 제어 연구가 진행되고 있다. 따라서, 자성 고무 복합재의 전자기적 특성을 효율적으로 활용하기 위해서는 자기 패터닝 뿐만 아니라 표면의 나노급 패터닝구조를 형성하는 새로운 연구가 필요하다.

다양한 소재의 표면에 패터닝을 형성시키기 위한 가공 공정으로는 extreme ultraviolet (EUV) lithography, nanoimprint lithography (NIL), E-beam lithography (EBL)와 같은 다양한 차세대 리소그래피 제조 및 특성제어 관련 공정연구가 지속적으로 이루어지고 있다.¹⁰⁻¹³⁾ 본 연구에서는 RMC 필름 또는 기판의 표면을 제어하는 기술로서 기존의 공정과는 다른 반도체 공정을 활용하고자 한다. 특히, NIL 공정 기술은 공정과정이 단순하고 비용이 저렴하며 높은 생산효율을 낼 수 있다는 장점을 가지고 있기 때문에 센서, 메모리, 전자부품, 반도체 소자 제작에 꾸준히 사용되고 있다.¹⁴⁻¹⁸⁾ 하지만, 일반적인 NIL 공정 기술들은 투명한 금형 제작, 임프린트 레지스트¹⁹⁾, 자외선²⁰⁾, 열²¹⁾과 같은 추가적인 공정을 필요로 하기 때문에 공정이 복잡하고 공정 비용 또한 크다. 따라서, 이러한 단점을 해결할 수 있는 간단하고 저렴한 공정비용으로 상온 직접 패터닝이 가능한 새로운 공정기술 개발이 필요하다.

본 연구에서는, RMC 기판 표면에 상온에서 극압 임프린트 리소그래피 (Extreme pressure imprint lithography,

EPIL) 공정을 통해 나노 스케일의 패터닝을 형성하고, RMC 패터닝의 자기적 효과를 보여주고자 한다. EPIL 공정은 간단한 몰드를 이용하여 상온에서 비진공 상태로 타겟 기판에 직접적인 압력을 가하여 소성변형을 유도하는 방식으로 패터닝이 진행되는 임프린트 공정이다. 즉, 본 연구에서는 마이크로/나노급 패터닝을 갖는 Si 몰드를 활용하여 자성을 띠는 유연한 고무기판에 EPIL 공정을 통해 3가지의 서로 다른 선 폭을 갖는 패터닝 구조물을 형성하는 방법을 소개하고자 한다.

2. 실험 방법

Fig. 1은 EPIL 공정을 통해 RMC 기판에 형성된 마이크로/나노 수준의 라인패턴(line-pattern)을 보여준다. 우선, 포토리소그래피 공정을 이용하여 라인의 너비와 스페이스의 너비가 1:1의 비율로 각각 500 nm/500 nm, 1 μm /1 μm , 250 nm/250 nm를 가지고 동일하게 500 nm의 패터닝 높이를 가지는 Si 마스터 몰드를 제작한다. EPIL 공정을 진행할 1축 유압 프레스 장비의 램헤드(RAM head)에 제작한 Si 마스터 몰드를 단단히 고정시킨다. Si 마스터 몰드에 새겨진 패터닝을 RMC 표면에 직접적으로 형성시키기 위해서 유압장비를 통해 약 2 ton의 힘을 타겟 기판에 약 10초 가한 후 분리시킨다. 이 때, 기판에 가하는 압력의 무게와 압력을 유지하는 시간은 패터닝 품질에 많은 영향을 미치기 때문에 신중하게 고려되어야 한다. 본 연구에서 사용된 자성 고무 복합재 기판은 85~95%의 스트론튬 페라이트 (Strontium ferrite)와 5~15%의 염소화폴리에틸렌 (Chlorinated polyethylene)으로 구성된 유연한 재료로서 바륨 페라이트(Barium ferrite) 보다 높은 투자율과 히스테리시스, 자기포화의 특성을 가지며 강한 자기성능을 가지는 장점이 있다. 하지만, 고무 기반 소재로 변형이 잘 일어나므로, 두께가 두꺼울수록 압력에 의한 변형이 커져 크랙(crack)이 발생할 위험이 높아 타겟 기판의 두께도 함께 고려되어야 한다. EPIL 공정 기술은 딱딱한 몰드를 사용하여 타겟 소재에 직접적으로 영구적인 변형을 주는 패터닝 방법으로서 일반적으로 NIL에 사용되었던 임프린트 레지스트, 자외선을 쬐어주는 추가적인 공

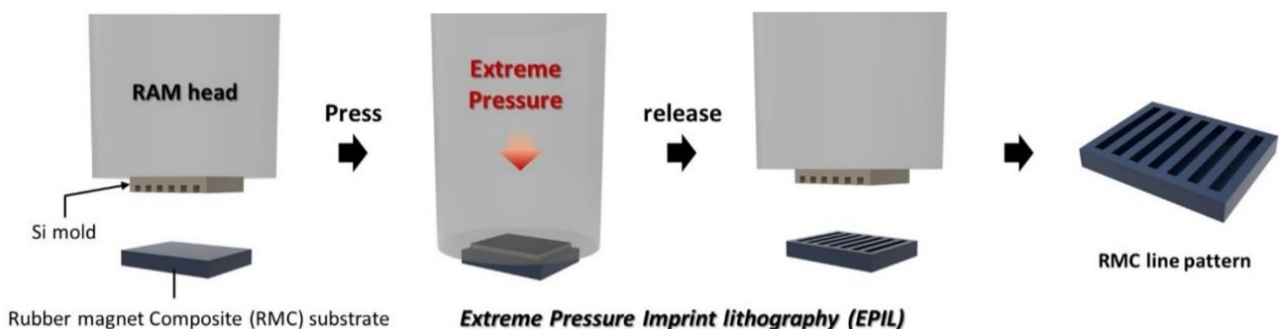


Fig. 1. Patterning procedure for rubber magnetic composite film via EPIL process.

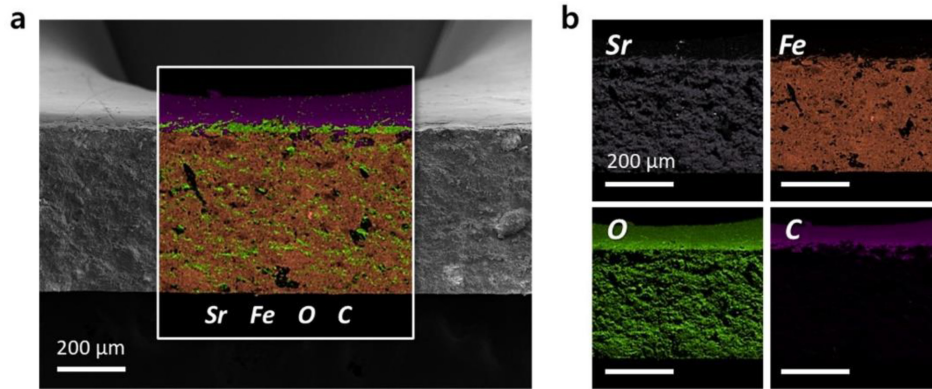


Fig. 2. Cross-sectional EDS mapping images of RMC film. (a) EDS mapping images of total elements. (b) EDS mapping images of Sr, Fe, O, and C.

정과정 없이 필요하지 않으므로 간단한 공정으로 빠르게 패턴의 형성이 가능하다는 장점을 보여준다.

3. 결과 및 고찰

RMC 기판의 표면에 마이크로/나노 수준의 패턴을 가진 Si 몰드를 기반으로 기판 표면에 극압 임프린트 리소그래피 공정을 적용하여 변화를 관찰하였다. Fig. 2는 RMC 기판의 단면을 주사전자현미경 (Scanning electron microscope, SEM)으로 관찰한 것이고, 동시에 에너지 분산형 분광 분석을 (Energy dispersive spectroscopy, EDS) 통해 성분을 분석한 결과이다. 본 연구에 사용된 RMC 기판은 $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ 의 분자식을 가지는 스트론튬 페라이트

(Strontium ferrite)와 염소화폴리에틸렌 (Chlorinated Polyethylene)으로 구성되어 있다. 복합재 단면에 대해 EDS mapping을 통해 분석한 오버레이 이미지와 개별 분석 이미지를 통해 기판 내부에는 스트론튬과 산화철이 전체적으로 고르게 분포하고 표면에는 탄소로 덮여 있다는 사실을 알 수 있다.

Fig. 3은 해당 기판에 서로 다른 3가지 선 폭을 가진 몰드를 사용하여 임프린트를 진행하여 얻어진 RMC 나노/마이크로 라인 패턴을 보여준다. Fig. 3a는 3가지 라인선 폭(I: 500 nm, II: 1 μm, III: 250 nm) 및 동일한 패턴 깊이(500 nm)를 갖는 구조물로 이루어진 Si 마스터 몰드이다. 이 때, Si 몰드는 RMC 유연기판 표면에 마이크로/나노급 패턴을 형성함에 있어서, 동일한 패턴 깊이/높이에 선폭

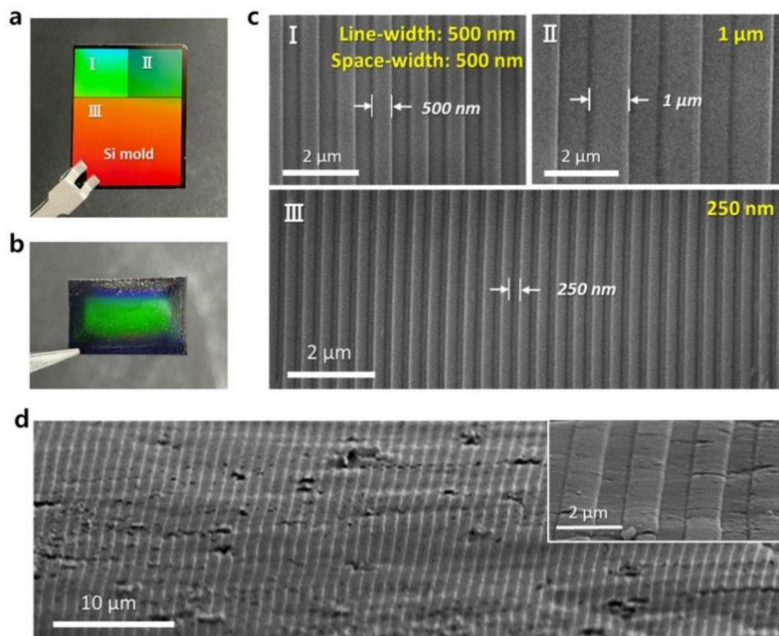


Fig. 3. Uniform pattern formation of RMC line structures via EPIL method. (a) Si master mold with three line/space widths of (I) 500 nm/500 nm, (II) 1 μm/1 μm, and (III) 250 nm/250 nm. Si mold was patterned by conventional photolithography process. (b) Photo image of patterned RMC film by EPIL. (c) SEM images of highly-ordered RMC line patterns. (d) Tilted SEM image of RMC line structure with a line-width of 1 μm.

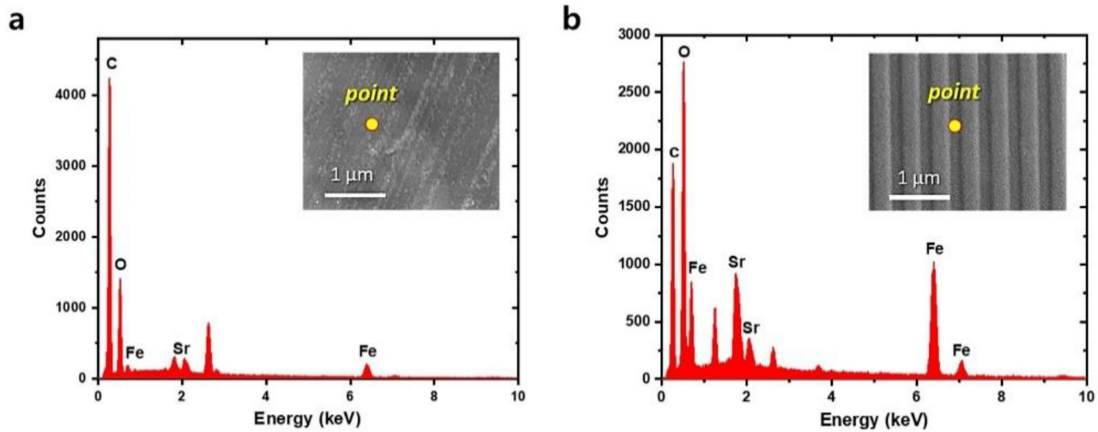


Fig. 4. Comparison of EDS spectrum graphs for RMC films before and after EPIL-patterning. (a) Non-patterned RMC film. (b) RMC line pattern with a line width of 250 nm.

을 달리하여 3가지 중횡비를 갖는 라인구조물 형성이 가능한지를 확인할 수 있도록 구성하였다. 해당 Si 몰드를 이용하여 RMC 표면 상 EPIL 공정을 진행하였고, 기관 표면을 SEM을 이용하여 관찰하였다. Fig. 3b는 250 nm 라인 선폭을 갖는 몰드를 통해 얻어진 대면적 RMC 패턴 기관 결과물이다. Fig. 3c는 500 nm, 1 μm, 250 nm 라인 선폭을 갖는 RMC 라인 패턴에 대한 SEM 이미지로서, 중횡비가 서로 다른 3가지 라인패턴이 모두 규칙적으로 정렬 패터닝된 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 EPIL공정을 통해 RMC 표면 패터닝이 가능함을 알 수 있고, 선폭과 피치 (Pitch)와 상관없이 패터닝이 가능하다는 것을 알 수 있다. RMC 패턴의 크기는 몰드 패턴의 크기에 의존하기 때문에, 더 작은 패턴을 얻기 위해서는 Si 몰드 패턴의 크기를 줄일 필요가 있다. 그리고, 라인/스페이스 패턴뿐만 아니라, 다양한 형상의 RMC 패턴 구현을 위해서는 Si 몰드 패턴 형상을 다양화할 필요가 있고, 후속 연구로 진행할 필요가 있다. 그리고, 응용처에 따라 패턴의 크기와 형상을 설계하고, EPIL 공정 기반 해당 RMC 패턴 제조가 가능할 것으로 판단된다. 그리고, Fig. 3d는 50 μm 크기 이상의 면적에 대하여 기울여(tilted) 촬영된 SEM 이미지로서 EPIL 공정을 통해 RMC 표면 패터닝이 대면적 영역에서 가능함을 명확하게 보여준다.

Fig. 4는 RMC 표면 상 EPIL공정 전후에 대한 에너지 분산형 분광 분석법 (Energy dispersive spectroscopy, EDS) 분석 결과이다. RMC 표면을 분석한 결과 C, Fe, Sr, O에 대한 원소로 구성됨을 확인할 수 있었다. (Fig. 4a) Fig. 4b는 RMC 표면을 250 nm의 선폭을 갖는 Si 몰드를 사용하여 EPIL 공정을 진행한 것에 대한 EDS 측정 결과물이다. EPIL 공정을 진행하지 않은 기관의 표면보다 라인패턴이 형성된 기관의 표면에서 더 높은 수준의 스트론튬 페라이트 성분 수치의 intensity를 보여준다. 이는 EPIL공정을 통해 가압된 영역에서 밀도의 증가에 의한 것으로 추정된다. 이는 EPIL 공정을 통해 RMC film 표면의 가압된 영역에서의 스트론튬 페라이트 성분의 부분적인 intensity

증가로 인한 자기특성의 변화가 기대되며 이를 통해서 후속 연구로서 해당 EPIL 공정에 의한 자기특성의 변화를 확인하고 제어할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요할 것으로 본다. 후속 연구를 통해서 얻은 결과로 제어된 자기 소재를 다양한 첨단 전자 부품으로 활용하는데 이바지할 것으로 기대된다. 즉, 패턴의 형상 및 크기에 대하여, 가압의 방향과 크기에 따른 자성에 대한 연구가 필요하며, 자기구조 (Magnetic domain structure) 제어연구를 통해 소재제작 및 특성 평가를 할 예정이다.

RMC 기관은 경도가 낮고 연성과 탄성을 가진 소재이기 때문에 기관의 두께가 두꺼워질수록 압력을 가했을 때 얇은 기관보다 변형이 크게 일어날 수 있다. 이러한 사실

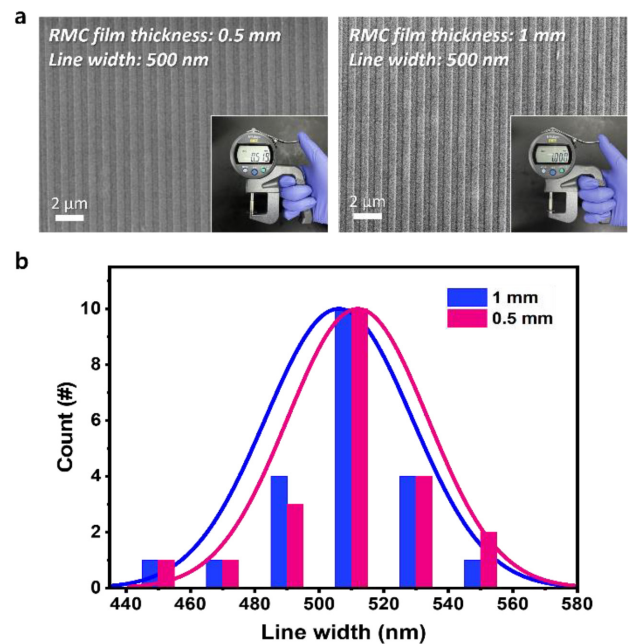


Fig. 5. Size distribution of 500 nm RMC line patterns via EPIL process. (a) RMC film thickness: (Left) 0.5 mm, (right) 1 mm. (b) Uniform size distribution of EPIL-printed RMC line structures for (a).

을 고려하여 EPIL 공정의 신뢰성을 확인하고자 Fig. 5에서 보는 바와 같이, 0.5 mm 두께의 RMC 기관과 1 mm 두께의 RMC 기관에 대해서 500 nm의 선폭을 갖는 Si 몰드를 이용하여 EPIL 공정을 진행하였다. Fig. 5a의 SEM 이미지에서 보는 바와 같이 0.5 mm 및 1 mm 두께의 RMC 표면 상에서 규칙적인 라인 패턴이 잘 형성되었다. 두 가지 두께의 RMC 기관 상 균일도를 분석한 결과, Fig. 5b 그래프에서 보는 바와 같이 임의의 라인들 (약 20군데)에 대하여 선폭을 분석한 결과, 0.5 mm 및 1 mm 두께 기관에 형성된 패턴의 평균 선폭은 각각 511.9 nm, 506.03 nm 이고, 그 표준편차는 2.06 nm, 9.27 nm로 오차범위 2% 이내의 정확하고 신뢰성 있는 패턴이 형성되었다는 사실을 확인하였다. 변형이 쉬운 재료라는 것을 감안하더라도 매우 훌륭한 나노 급의 패턴이 성공적으로 잘 형성된 것으로 보아 향후 소자 응용 및 결과가 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서는 유연한 자성 고무 복합재 기관의 표면에 극압 임프린트 리소그래피 (EPIL) 공정을 통해 나노/마이크로 크기의 미세패턴을 형성하는 방법을 제시하였다. 우선, 포토리소그래피 공정을 통해 250 nm, 500 nm, 1 μm 라인/스페이스를 갖는 3가지 Si 몰드를 제작하였고, 해당 Si 몰드를 사용하여 자성 고무 복합재 (RMC) 기관 표면을 상온에서 짧은 시간동안 가압하여 소성변형된 RMC 패턴을 성공적으로 제조할 수 있었다. SEM과 EDS 분석을 통해 패터닝 전후 자성소재 원소가 그대로 존재함을 확인하였고, 가압된 영역에서의 밀도가 증가함을 알 수 있었다. 그리고, 0.5 mm 및 1 mm 두 가지의 두께의 RMC 기관에 대하여 EPIL 공정을 진행하여 매우 규칙적인 라인패턴을 형성할 수 있었고, 기관의 두께에 상관없이 RMC 패터닝이 가능함을 알 수 있었다. 본 연구에서 제시된 결과를 활용하여 향후 다양한 자기소재 기관의 표면 패터닝과 형상 제어를 통해 자력 방향 등의 특성 제어가 가능할 것으로 생각되고, 이러한 제어된 자기소재를 다양한 첨단 전자기소자 부품으로의 응용이 가능할 것으로 기대한다.

감사의 글

이 논문은 국립부경대학교 자율창의학술연구비(2023년)에 의하여 연구되었음.

References

1. M.-F. Chen, Y.-P. Chen, W.-T. Hsiao, Z.-P. Gu, "Laser direct write patterning technique of indium tin oxide film", *Thin Solid Films*, 515(24), 8515-8518 (2007)

2. B. Zhou, W. Huang, W. Fan, H. Zhang, H. Yu, K. Long, Z. Liu, "Development of Flexible Rare Earth-Fe-B Rubber Magnets toward Efficient Utilization of Ce, La, and Y Elements", *Advanced Engineering Materials*, 25(23), 2301329 (2023)
3. J. Kruželák, R. Sýkora, R. Dosoudil, I. Hudec, "Magnetic composites prepared by incorporation of strontium ferrite into polar and non-polar rubber matrices", *Polymer Composites*, 38(11), 2480-2487 (2017)
4. R. Sýkora, V. Babayan, M. Ušáková, J. Kruželák, I. Hudec, "Rubber composite materials with the effects of electromagnetic shielding", *Polymer Composites*, 37(10), 2933-2939 (2016)
5. M. Przybylski, B. Ślusarek, T. Bednarczyk, G. Chmiel, "Magnetic and mechanical properties of strontium ferrite and Nd-Fe-B rubber bonded permanent magnets", *Acta Phys. Pol. A*, 136(5), 685-688 (2019)
6. M. H. Makled, T. Matsui, H. Tsuda, H. Mabuchi, M. K. El-Mansy, K. Morii, "Magnetic and dynamic mechanical properties of barium ferrite-natural rubber composites", *Journal of Materials Processing Technology*, 160(2), 229-233 (2005)
7. I. Kong, S. H. Ahmad, M. H. Abdullah, D. Hui, A. N. Yusoff, D. Puryanti, "Magnetic and microwave absorbing properties of magnetite-thermoplastic natural rubber nanocomposites", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 322(21), 3401-3409 (2010)
8. D. S. Esteves, M. F. C. Pereira, A. Ribeiro, N. Durães, M. C. Paiva, E. W. Sequeiros, "Development of MWCNT/Magnetite flexible triboelectric sensors by magnetic patterning", *Polymers*, 15(13), 2870 (2023)
9. S. Pattipaka, T. W. Park, Y. M. Bae, Y. Na, K. Chung, K.-I. Park, J. Ryu, W. I. Park, G.-T. Hwang, "A nanoscale surface engineered magneto-mechano-triboelectric nanogenerator enabled by reliable pattern replication for self-powered IoT devices", *Sustainable Energy & Fuels*, 8(3), 649-656 (2024)
10. J. Miyazaki, A. Yen, "EUV lithography technology for high-volume production of semiconductor devices", *Journal of Photopolymer Science and Technology*, 32(2), 195-201 (2019)
11. M. Modaresialam, Z. Chehadi, T. Bottein, M. Abbarchi, D. Grosso, "Nanoimprint lithography processing of inorganic-based materials", *Chemistry of Materials*, 33(14), 5464-5482 (2021)
12. Y. Wang, J.-A. Pan, H. Wu, D. V. Talapin, "Direct wavelength-selective optical and electron-beam lithography of functional inorganic nanomaterials", *ACS nano*, 13(12), 13917-13931 (2019)
13. K. D. Ahn, S. H. Oh, "Fabrication of Fluorescent Oxygen Sensor Probe Module Based on Planner Lightwave Circuits using UV Imprint Lithography", *Journal of the Microelectronics and Packaging Society*, 25(3), 37-41 (2018)
14. T. W. Park, S. Kim, E. B. Kang, W. I. Park, "Room Temperature Imprint Lithography for Surface Patterning of Al Foils and Plates", *Journal of the Microelectronics and Packaging Society*, 30(2), 65-70 (2023)
15. M. C. McAlpine, R. S. Friedman, C. M. Lieber, "Nanoimprint lithography for hybrid plastic electronics", *Nano Letters*, 3(4), 443-445 (2003)
16. M. Meier, C. Nauenheim, S. Gilles, D. Mayer, C. Kügeler, R.

- Waser, "Nanoimprint for future non-volatile memory and logic devices", *Microelectronic engineering*, 85(5-6), 870-872 (2008)
17. S. H. Lim, B. Radha, J. Y. Chan, M. S. M. Saifullah, G. U. Kulkarni, G. W. Ho, "Flexible palladium-based H₂ sensor with fast response and low leakage detection by nanoimprint lithography", *ACS Applied Materials & Interfaces*, 5(15), 7274-7281 (2013)
18. S. Barcelo, Z. Li, "Nanoimprint lithography for nanodevice fabrication", *Nano Convergence*, 3(21), 1-9 (2016)
19. J. W. Yi, M. Jeong, "A Study on the Surface and Manufacturing Method of Nanostructure for Amplification of Plasmonic Phenomena of Nanoparticles", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 29(1), 55-59 (2022)
20. M. J. Haslinger, T. Mitteramskogler, S. Kopp, H. Leichtfried, M. Messerschmidt, M. W. Thesen, M. Mühlberger, "Development of a soft UV-NIL step&repeat and lift-off process chain for high speed metal nanomesh fabrication", *Nanotechnology*, 31(34), 345301 (2020)
21. N. Unno, T. Mäkelä, "Thermal nanoimprint lithography—A review of the process, mold fabrication, and material", *Nanomaterials*, 13(14), 2031 (2023)