Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 20, No. 2, pp. 107-115, 2026
https://doi.org/10.23042/radin.2026.20.2.107

Original article

나노구조 기반 단색 X-선 발생 사전연구

채문식[1,*] · 이재현[1]

[1]한국원자력연구원 첨단방사선연구소, [2]한국원자력연구원 양성자과학연구단

Preliminary Study on Generation of the Monochromatic X-ray Based on Nanostructure

Moonsik Chae[1,*] and Jaehyun Lee[2]

[1]Advanced Radiation Research Institute, KAERI, 29, Geumgu-gil, Jeongeup-si, Jeonbuk-do 56212, Republic of Korea
[2]KOMAC, KAERI, 181, Mirae-ro, Gyeongju-si, Gyeongsangbuk-do 38180, Republic of Korea

ABSTRACT Generally X-rays generated from vacuum tubes or electron accelerators are produced via Bremsstrahlung, resulting in a continuous energy spectrum. Using such X-rays with a broad energy distribution for X-ray diagnostics, including security screening, or for materials analysis inevitably leads to the degradation of image quality. While methods such as utilizing physical energy filters or employing software-based image enhancement algorithms are sometimes used to mitigate this drawback, these do not offer a fundamental solution. Therefore, monochromatic X-rays are typically generated using large-scale synchrotron accelerators, or, on a laboratory scale, by utilizing electron guns capable of producing characteristic spectra. However, these methods suffer from the limitations of requiring enormous facilities or being restricted to specific X-ray wavelengths. This paper describes preliminary research on a device capable of generating monochromatic X-rays based on a nanoundulator structure. First, a nanostructure model was created to analyze the magnetic field, and electron beam trajectory simulations were conducted. Subsequently, an actual fabrication test was performed using electron beam lithography equipment based on the modeled dimensions. Through this, the technical elements and processes necessary for fabricating a nanoundulator for monochromatic X-ray generation were confirmed. This device is ultimately expected to contribute to the revolutionary improvement of the performance of instruments such as security scanners, medical X-ray diagnostic equipment, and materials analysis tools like electron microscopes.

Key words: Monochromatic X-ray, Nanoundulator, X-ray Image

1. 서 론

X-선은 물체를 투과하는 특성으로 인해 물체의 내부 정보를 얻는데 널리 활용된다. 일상에서 쉽게 찾아볼 수 있는 X-선 영상 활용 분야로는 의학적인 환부의 진단[1], 공항이나 항만과 같은 경계시설의 보안검색[2], 제조나 정비 공정 상의 비파괴검사[3] 등이 있다. 뿐만 아니라 X-선 이미징이나 분광분석 기법을 적용하여 화학적, 생물학적으로 재료의 구조나 성분을 분석하는 데에도 필수적으로 활용된다[4].

산업적인 목적으로 X-선을 발생시키는 가장 일반적인 방법은 전자를 금속 타겟에 입사시키는 것이다. 전자가 금속 원자와 충돌하여 감속할 때 발생하는 에너지의 변화가 제동복사 X-선과 특성 X-선으로 방출된다. 의료용 X-선 장비나 보안검색기, 비파괴검사 장비 등에는 이러한 원리가 적용된 X-선 튜브나 전자가속기를 주로 사용한다.

한편, 움직이는 전자의 궤적이 자기장에 의해 휠 때에도 X-선이 발생되는데 이것을 '방사광'이라 한다. 전자의 궤적을 휘도록 하기 위해서는 이극자석을 사용하는데, 실제로는 하나의 이극자석이 아니라 여러 개의 이극자석을 직선형으로 배열한 구조의 언듈레이터와 같은 장치를 사용한다. 언듈레이터를 지나는 전자빔은 궤적이 반복적으로 휘게 되는데 이 때 방출되는 방사광들이 서로 중첩되면서 최종적으로 좁은 에너지 스펙트럼의 단색 X-선을 방

ISSN 1976-2402 **http://www.ksri.kr/**

Copyright© 2026 by Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author:** Moonsik Chae
Tel: +82-63-570-3431, Fax: +82-63-570-3429, E-mail: cmswill@kaeri.re.kr

Received 12 December 2025 **Revised** 15 April 2026 **Accepted** 20 April 2026

출하게 된다[5](Fig. 1 [6]).

X-선 튜브에서 발생되는 X-선은 일반적으로 넓은 범위의 에너지 스펙트럼을 가진다. 구체적으로 X-선의 최대 에너지는 금속 타겟에 입사하는 전자빔의 에너지에 의해 결정되며, 타겟의 물질종류와 기하구조에 따라 0부터 최대 에너지까지 연속적인 에너지 스펙트럼을 가진다. 투과나 산란, 회절과 같은 전자빔과 물질 간의 반응 특성은 전자빔의 에너지에 따라 달라진다. 따라서 이미징이나 분석을 할 때 연속적 에너지 분포를 가지는 X-선을 사용할 경우 다양한 반응 특성을 가지는 X-선 검출 신호를 함께 측정할 수밖에 없으며 이는 이미징이나 분석 결과의 질을 저해하는 가장 큰 요인이 된다.

한편, 방사광가속기의 X-선은 대단히 좁은 범위의 단색 에너지 스펙트럼과 결맞음 특성을 가진다(엄밀하게는 단색이 아니라 준단색(quasi-monochromatic)임). 이는 레이저의 특성과 동일한 것으로 이러한 성질의 X-선을 발생시키기 위해 XFEL (X-ray Free Electron Laser)을 활용한다. 그러나 XFEL 시설은 수백 미터에서 수 킬로미터에 이르는 거대한 장치들로 구성되는데, 이는 레이저의 특성을 가지는 X-선을 발생시키기 위해서는 수 GeV의 에너지를 가지는 전자빔이 필요하며, 이러한 에너지의 전자빔을 가속시키기 위해 아주 긴 길이의 가속기가 필요하기 때문이다.

언듈레이터로부터 발생되는 방사광의 파장은 다음 관계식에 의해 결정된다[5].

$$\lambda = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2}\left(1 + \frac{K^2}{2}\right) \text{ where } K = \frac{eB_0\lambda_u}{2\pi m_e c} \quad (1)$$

여기에서 λ는 언듈레이터로부터 발생되는 방사광의 파장, λ_u는 언듈레이터 이극자석 배열의 주기, γ는 전자 에너지와 관계되는 로렌츠 인수이며, K는 언듈레이터 무차원 변수로서 B_0는 언듈레이터 피크 자기장의 세기이다.

관계식에서 알 수 있듯이 같은 자기장 조건에서 언듈레이터로부터 발생되는 방사광의 파장은 언듈레이터 자석의 주기(간격)가 작을수록 그리고 전자빔의 에너지가 커질수록 작아지게 되는데, 방

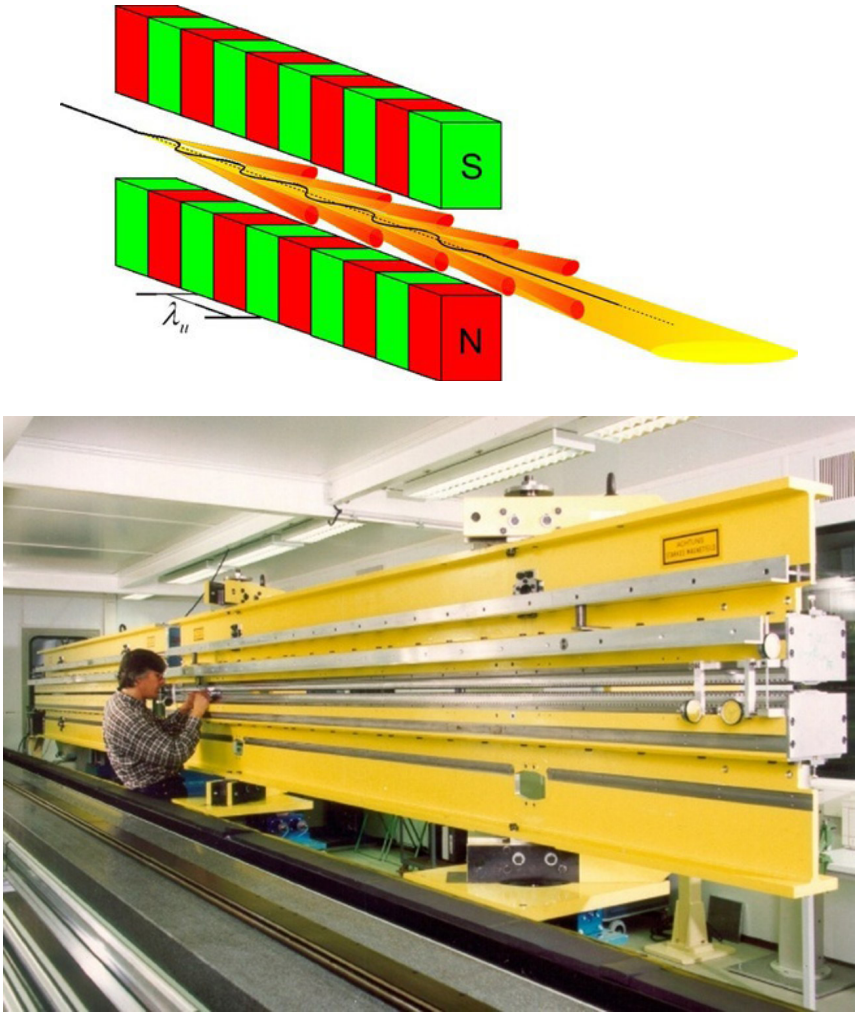

Fig. 1. Schematic diagram of an undulator (top) and the undulator installed in DESY synchrotron facility (bottom)

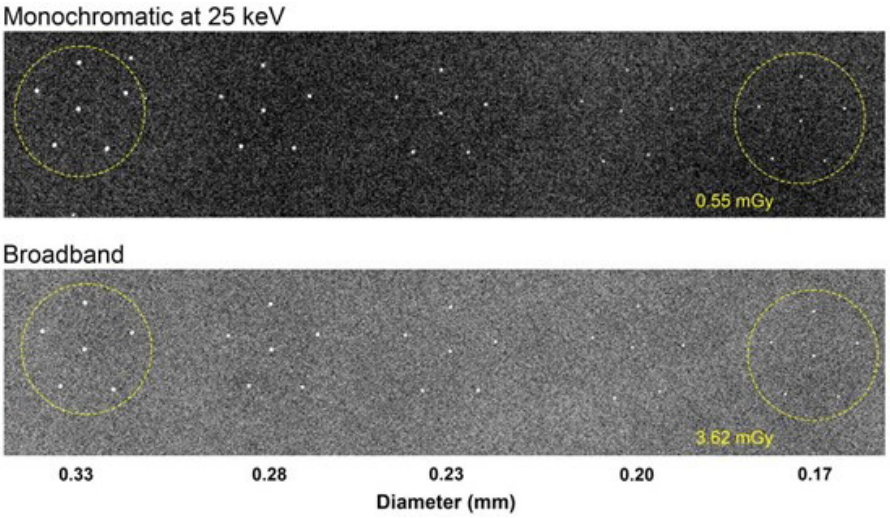

Fig. 2. Comparison of contrast ratio between monochromatic X-ray image (top) and polychromatic X-ray image (bottom). When using monochromatic X-rays, it is possible to acquire images with higher contrast using a lower X-ray dose.

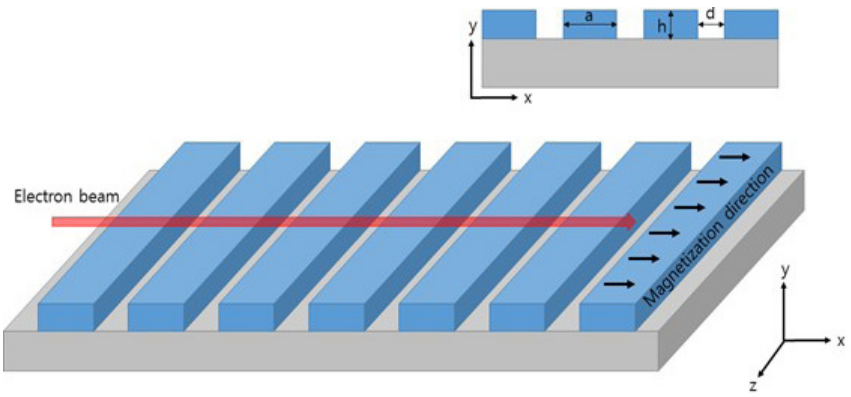

Fig. 3. Structure of a nanoundulator. The structure has a geometry where magnetic elements are periodically arranged in a grating configuration upon a planar substrate, with the electron beam trajectory being parallel to the grating structure.

사광의 파장이 작아진다는 것은 더욱 높은 에너지의 X-선을 얻을 수 있음을 의미한다. 실제로 수 keV 이상의 단색 X-선을 얻기 위해서는 수백 MeV 이상 에너지의 전자빔과 수 m 정도 크기의 언듈레이터가 필요하며, 따라서 방사광가속기와 같은 거대한 시설이 필요하게 된다. 실제 건물 길이가 1 km에 이르는 포항가속기연구소 XFEL에서 사용되는 Soft X-ray 빔라인 언듈레이터의 경우 전자빔 에너지 3.15 GeV, 언듈레이터 주기 35 mm (전체 길이 5 m), 언듈레이터 자기장 1 T 조건에서 0.25~1.5 keV 범위의 X-선을 발생시킨다[7]. 그러나 이러한 규모의 시설을 구축하는 데에는 현재 기준으로 조 단위 이상의 막대한 예산이 필요하다. 한편, 거대한 가속기 시설에서 발생되는 고에너지 전자빔이 아니더라도 keV급 X-선을 발생시킬 수 있는데 이것은 언듈레이터 주기(위 식의 λ_u)를 나노미터 수준으로 작게 만듦으로써 구현할 수 있다. 즉 나노구조체를 사용하여 단색 X-선을 발생시킬 수 있게 된다. 가령, 현실적으로 고려해 볼 수 있는 사양으로서 100 nm 주기의 언듈레이터 구조에 1 MeV 전자빔을 통과시키는 경우 발생되는 X-선 에너지는 0.217 keV 정도로 이는 탁상형 장치로부터 대형 방사광가속기에 준하는 에너지의 X-선을 얻을 수 있음을 의미한다.

단색 X-선을 이미징에 사용할 경우 여러 가지 이점을 가질 수 있는데 영상의 명암비 향상[8,9], 빔 경화 현상(beam hardening) 저감[10], 불필요한 산란 최소화[11] 등의 효과로 영상의 해상도를 획기적으로 높일 수 있을 뿐만 아니라 동일한 이미징 결과를 상대적으로 낮은 선량의 X-선으로도 얻을 수 있다(Fig. 2)[12]. 따라서 연구용 X-선 현미경이나 의료용 X-선 진단장치의 성능을 크게 향상시킬 수 있게 된다.

또한 언듈레이터로 발생시키는 X-선은 언듈레이터의 기하구조

와 이극자석의 자기장을 조절하여 X-선의 파장을 가변하는 것이 가능해진다. 이는 단일 파장의 방사선을 방출할 수 있는 또 하나의 주요 원천인 동위원소와 가장 큰 차이라 할 수 있다.

나노언듈레이터는 마이크로미터 이하 크기의 간격을 가지는 이극자석 구조에 전자빔을 통과시켜 X-선을 발생시키는 장치로 2021년 MIT에서 설계 연구가 진행된 바 있다[12]. 나노언듈레이터는 평면 형태의 몸체 위에 길고 납작한 형태의 전자석 구조를 반복 배열 형태로 접합시킨 구조이며, 실제로는 실리콘 기판과 같은 몸체 위에 철이나 니켈 같은 자성체 합금 재질의 전자석 구조를 배열하는 형태로 구현된다. 단색 X-선은 전자석 배열에 평행하게 근접하도록 전자빔을 통과시킬 때 대략적으로 전자빔 진행 방향으로 발생된다(Fig. 3 [13]). 단색 X-선을 발생시키기 위한 나노언듈레이터를 구현하기 위해서는 전자빔의 발생과 미세구조에 대한 정밀 입사, 나노구조체에 대한 설계와 제작, X-선의 발생 제어와 인출 등 여러 개별 주제들에 대한 심도 있는 연구를 필요로 하기 때문에 여기에서는 나노구조체의 설계, 제작에 집중하여 이와 관련한 세부 연구 내용과 방향을 탐색하기 위한 목적으로 사전 연구를 수행하였다. 구체적으로 전자빔이 반복적으로 휘도록 하는 나노언듈레이터 구조에서의 전자빔 거동 시뮬레이션과 나노언듈레이터 구조의 실제 가공성에 대해 검토하였다.

2. 전자빔 거동 시뮬레이션 (beam dynamics simulation)

시뮬레이션을 위한 언듈레이터 구조는 평면 몸체 위에 자성체가 격자 구조를 이루도록 모델링하였다. 모델링의 각 세부치수의 경우 목표로 하는 X-선 파장을 먼저 결정하여 역으로 계산하여야 하겠으나 본 사전연구에서는 나노구조의 가공이 실제로 가능한 한계 범위를 고려하여 치수를 우선 결정하였으며 격자 수는 100개로 정하였다(Fig. 4). 이 경우 X-선의 파장은 이렇게 정해진

Table 1. Design parameters of the nanoundulator modeling

Parameter	Value	Note
a	500 nm	
b	250 nm	
c	125 nm	0.5 x b
h	50 nm	
t	1 mm	
w	100 μm	
L	75 μm	(a+b) x N

기하 구조에 대한 고유값으로 결정되며, 격자 수는 X-선의 세기와 관련되는 변수로서 파장과는 관계가 없고, 다만 X-선 에너지 스펙트럼의 폭과 관련이 있어서 격자 수가 많아질수록 X-선 단색성이 좋아지게 된다. Table 1에 언듈레이터 격자 구조 모델링에 대한 상세 치수를 나타내었다.

전자빔 거동 시뮬레이션에는 가속기 연구분야에서 전자기장 해석과 전하 거동 분석에 가장 널리 사용되는 프로그램인 CST를 이용하였다[14]. 앞서 결정한 격자 구조 치수에 따라 우선 시뮬레이션 모델링을 작성하고, 여기에 대하여 자기장 분포 분석을 진행한 후 전자빔을 입사시켰을 때의 거동을 분석하기로 하였다. 모델링에서 몸체에는 실리콘, 자기장 격자 구조에는 철을 각각 적용하였다.

일반적으로 이렇게 가상 물리현상을 시뮬레이션하는 프로그램은 유한요소해석 기법을 사용하는데 이 경우 모델링에 얼마나 최적 메쉬(mesh) 구조를 설정하는지에 따라 시뮬레이션 결과의 정확도와 시뮬레이션 소요시간이 크게 차이가 나게 된다. 실제 시뮬레이션에서는 컴퓨팅 파워의 한계로 모델링의 일부 치수와 격자 수를 조정하여 시뮬레이션을 진행하였다. 두께(t)의 경우 실리콘 몸체는 자기장을 띠지 않으므로 격자 구조의 자기장에 의해 변

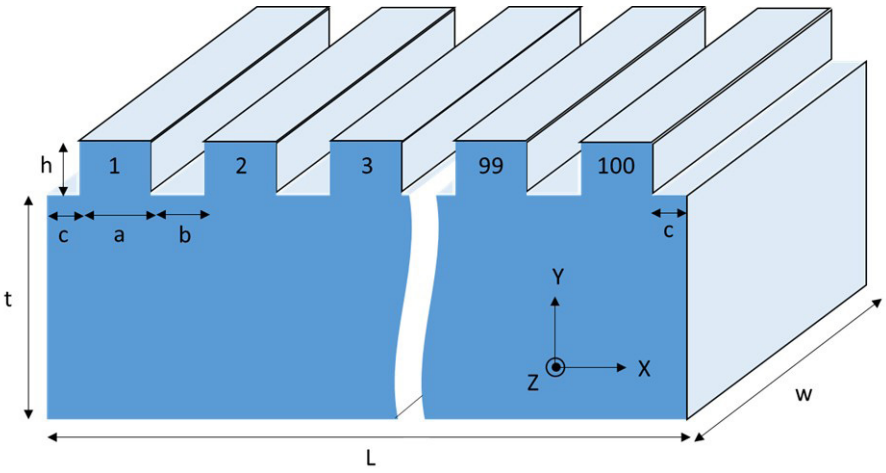

Fig. 4. Defining the dimensions of the nanostructure for CST electron beam trajectory simulation.

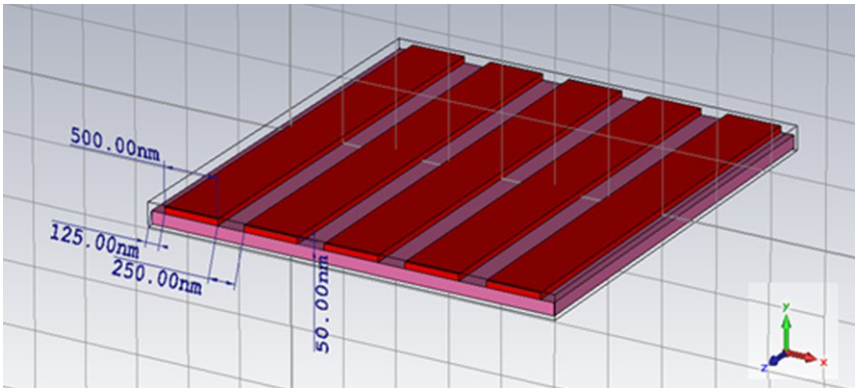

Fig. 5. Reduced-scale nanostructure modeling with a decreased number of grating elements.

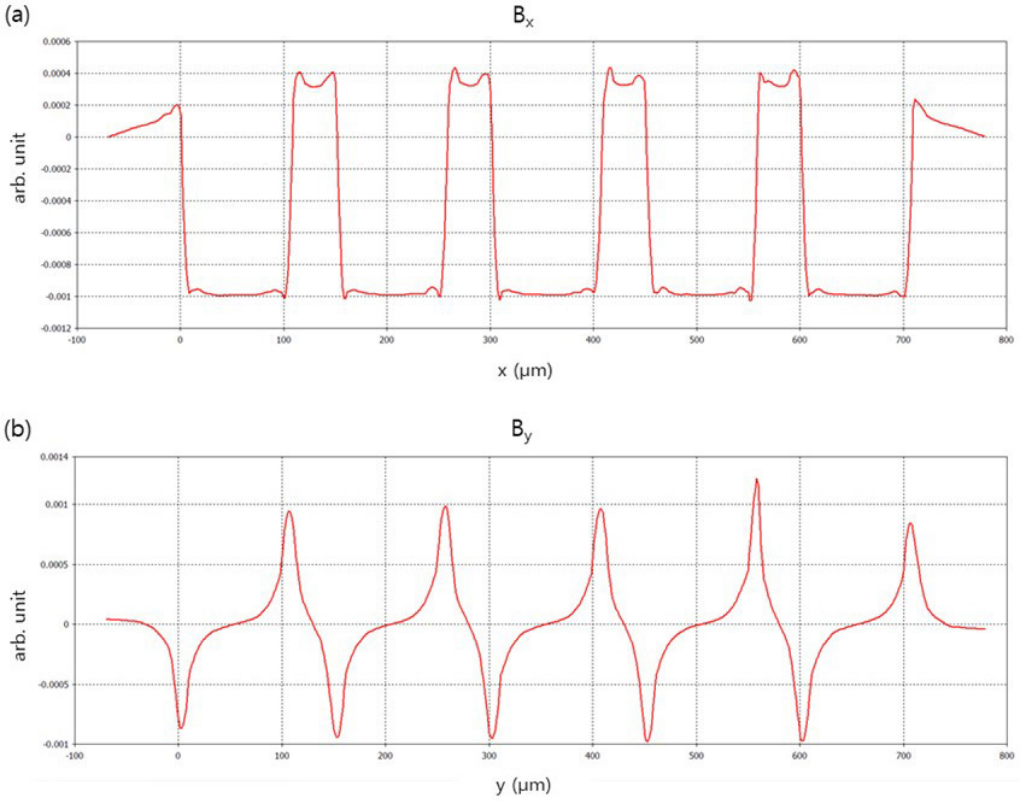

Fig. 6. The distribution of the magnetic field intensity at the upper point of the grating in the X direction (a) and Y direction (b).

화하는 전자빔 궤적과는 무관하기 때문에 50 nm로 크기를 줄였다. 격자 수의 경우 5개로 줄였는데, 이 경우 자기장 중첩 효과가 약해지므로 가장자리 격자와 가운데 격자 간의 자기장 크기 차이가 100개일 때와 비교하여 더 커지는 문제가 있으나 격자로부터 근접 범위(본 모델링에서는 수 십 nm 이내)에서는 개별 격자의 자기장 분포가 거의 그대로 유지되기 때문에 전자빔 궤적 변화 추이를 살펴보는 데는 문제되지 않을 것으로 판단하여 그대로 진행하였다. 조정된 치수가 반영된 시뮬레이션 모델링을 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 6(a)는 모델링의 격자 상부에서 형성되는 X-방향 자기장의 상대적 크기를 분석한 결과이며, Fig. 6(b)는 Y 방향에 대한 결과이다. 자기장의 절대적 크기는 자성체 물질의 종류, 최적 전자빔 궤적 조건 등에 대한 별도의 논의가 필요한 주제로 여기에서는 상대적인 자기장 분포만 분석하였으며, 그림에서 자기장 크기의 반복 주기가 격자 구조의 크기와 일치하는 것을 볼 때 자기장이 잘 형성됨을 확인할 수 있었다.

주기적인 자기장이 형성되는 것을 확인한 후 CST를 이용하여 전자빔 거동 시뮬레이션을 진행하였다. 전자빔의 초기 에너지는

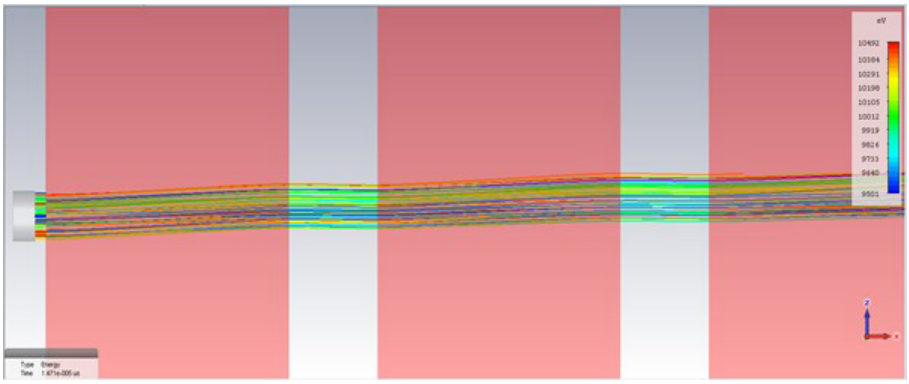

Fig. 7. Results of the CST simulation when an electron beam is incident upon the magnetically applied nanostructure.

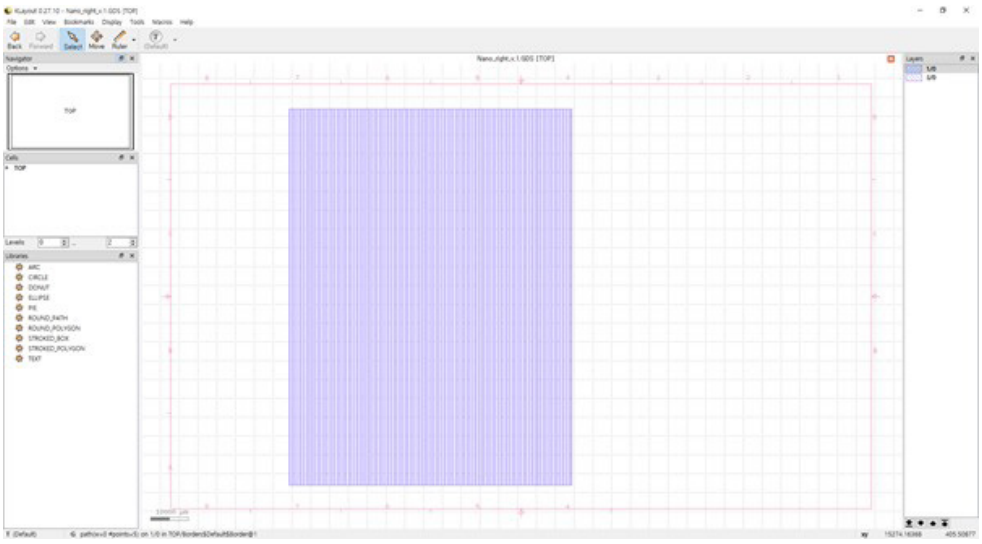

Fig. 8. GDS layout designed for the lithography process.

20 kV, 전자빔 진행 궤적과 격자 구조 상단 간의 간격은 100 nm, 격자의 자기장은 1 T로 가정하였다. 시뮬레이션 결과 전자빔 궤적이 격자 주기만큼 꺾이면서 진행하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 7에 CST를 이용한 전자빔 궤적 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 본 시뮬레이션은 나노미터 수준의 구조체에 대한 전자빔 거동 시뮬레이션을 시도하였다는 의미가 있으며, 추후 정확한 시뮬레이션을 위해서는 나노 구조의 기하학적 변수와 자기장, 전자빔의 에너지와 입사각 등 입사 조건에 대한 최적화가 필요할 것으로 보인다.

3. 나노구조체 제작성 검토 (Feasibility test on nanostructure fabrication)

실제 나노 구조체의 가공을 위해 전자빔 리소그래피 기술을 활용하였다. 전자빔 리소그래피는 nm 수준의 형상을 직접 가공할 수 있으며, Raith, JEOL 등 상용 전자빔 리소그래피 장비 제조사는 10 nm 내외 수준의 해상도와 위치 정밀도를 가지는 제품 사양을 제시하고 있다. 그러나 실제 가공에서는 재료의 종류, 가공 구조체의 형상 등에 따라 가공 품질이 크게 영향을 받기 때문에 가공 해상도 목표에 따라 전자빔 조사 공정이나 반복 공정 등에 대한 최적 절차 수립이 필요하다. 여기에서는 앞서 언급한 나노구조 모델링 치수를 토대로 진행한 사전 가공성 테스트에 대해 기술하였다.

나노구조 가공은 한국나노기술원(KANC)에 의뢰하여 진행하였으며, 가공에 앞서 반도체 회로 설계에 주로 사용하는 KLayout 프로그램을 이용하여 공정용 GDS 포맷으로 가공 설계도를 작성하였다(Fig. 8). 가공 장비는 JEOL사의 E-beam lithography II 6000 모델을 사용하였으며, 2개의 샘플에 대해 1회 공정 진행 후 가공 상태를 확인하기 위해 집속이온빔 장치인 FEI사의 Nova Nanolab 모델로 형상 분석을 진행하였다. 분석 결과 수평방향(X축)의 경우 식각된 부분(변수 b)은 250 nm 설계치수에 대하여 두 샘플 각각 −3.8 nm와 +14.4 nm, 식각되지 않은 부분(변수 a)은 500 nm 설계치수에 대하여 +5.9 nm와 −16.4 nm의 오차가 발생

하였으며, 특히 격자 구조의 깊이(Y축, 변수 h)는 50 nm 설계치수에 대하여 +33.45 nm와 +31.31 nm의 큰 오차가 발생한 것을 확인하였다(Fig. 9).

전반적으로 격자의 형상은 잘 가공이 되었으나 특정 방향에 대한 가공 치수가 많은 오차를 보였으며, 또한 격자 구조의 표면 요철 모양(Fig. 9의 오른쪽 아래 노란색 표시 부분)이 정확하게 직사각형이 아니라 사다리꼴로 비스듬하게 가공된 것을 확인하였다. 이러한 가공 치수 오차와 형상의 차이를 최소화하기 위해서는 전자빔 조사 방향과 세기, 전자빔 집속 정도의 조정과 반복 공정 적용이 필요하며, 향후 이러한 상세 공정에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다.

4. 고 찰

지금까지 단색 X-선을 발생시키기 위한 장치로서 나노언듈레이터를 구현하기 위한 몇 가지 사전 연구들에 대해 논의하였다. 나노언듈레이터 구조를 모델링하고 자기장 분포를 분석하였으며, 전자빔 거동 시뮬레이션을 통해 전자의 궤적 변화를 분석하였다. 한

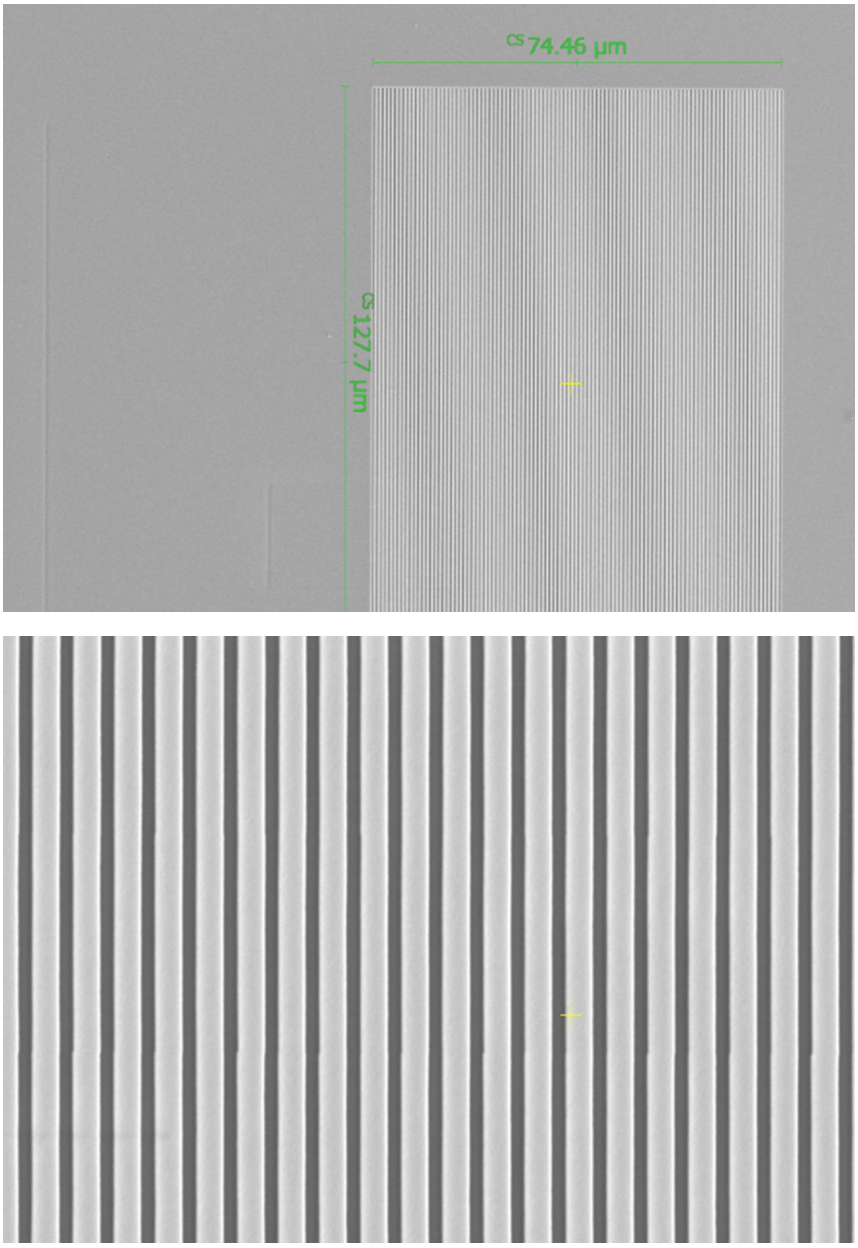

Fig. 9. Magnified images of the nanoundulator grating structure fabricated using electron beam lithography equipment. The yellow section in the fourth figure represents the surface profile of the grating structure.

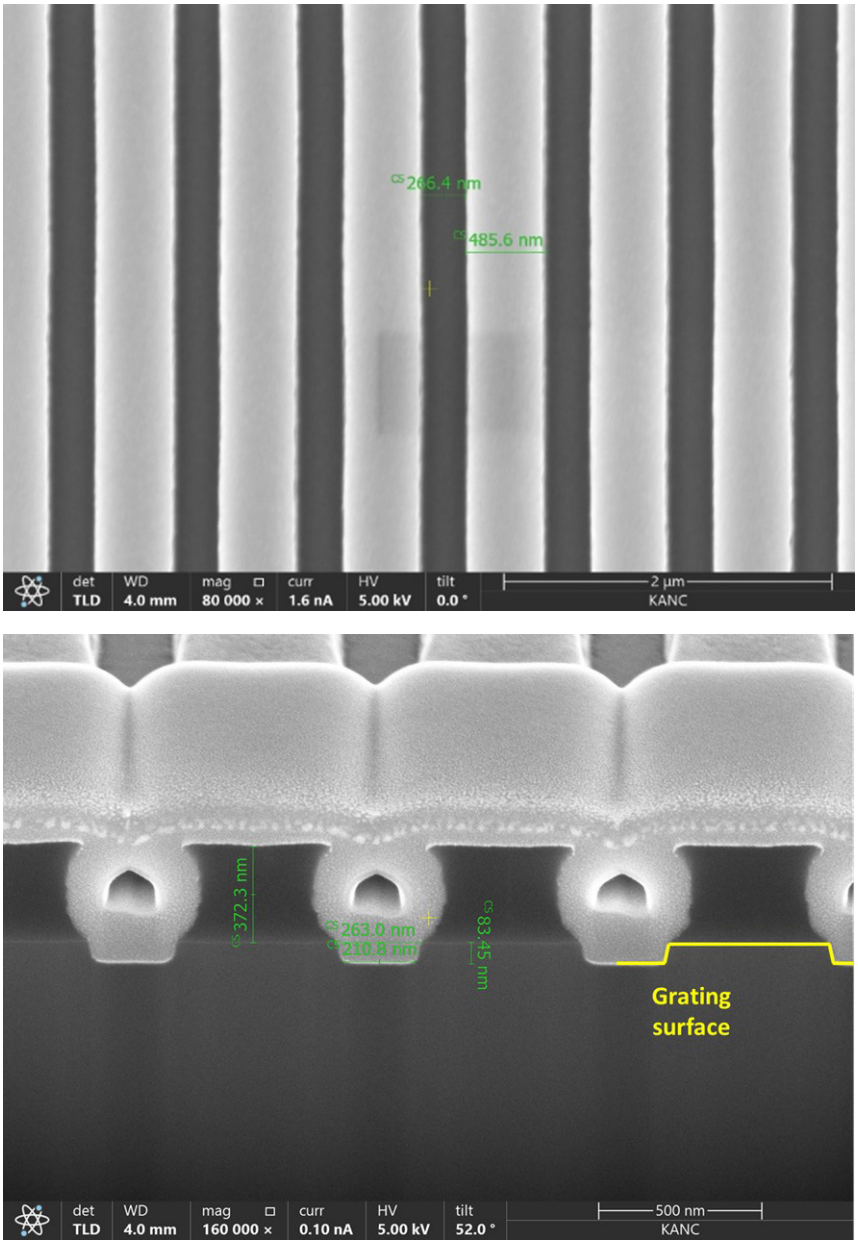

Fig. 9. Continued

편, 나노 구조에 대한 가공성을 검토하기 위해 모델링 치수를 토대로 하여 전자빔 리소그래피 장비로 실제 가공 테스트를 진행하였다. 본 연구는 나노 언듈레이터를 구현하기 위한 사전 연구로서 필요하고 극복해야 할 제반 기술과 도구들을 파악하기 위한 목적으로 수행되었다. 나노언듈레이터의 구조와 관련하여 향후에는 실제 사용하고자 하는 단색 X-선 특성에 기반하여 모델링을 만들고 방사광 시뮬레이션 툴을 활용하여 전자빔 궤적 변화에 따른 X-선 발생 시뮬레이션을 진행해야 할 것으로 보인다. 또한 일종의 기판 역할을 하는 몸체와 자성체의 물질을 선정하고 필요시 이들을 접합할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다. 한편, 나노 구조 가공과 관련하여 현재의 장비와 기술 수준을 고려했을 때 반복 공정이 필수적일 것으로 보이며, 따라서 전자빔의 조사 방향이나 가공 순서에 따른 가공 상태 검증 등 공정 절차에 대한 분석이 필요할 것으로 보인다.

현재 단색 X-선을 발생시키기 위한 나노언듈레이터는 기술 구현을 위한 개념적 연구 수준에 머무르고 있다. 그러나 위에서 언급한 기술적 요소들이 극복된다면 X-선 이미징 분야에서 획기적인 개선이 가능할 것으로 예상된다. 기존의 연속 스펙트럼 X-선 이미징과 비교하여 단색 X-선 이미징은 산란에 의한 노이즈를 크게 저감할 수 있고 형상 경계가 뚜렷하게 나타나는 위상차 이미지

영상을 얻을 수 있기 때문에 미세 구조를 정확하게 분별해야 하는 의료 분야나 X-선 이미징을 사용하는 연구 분야에서 널리 활용될 수 있다. 또한 적은 선량으로도 양질의 X-선 이미지를 얻을 수 있기 때문에 피폭 선량을 줄이기 위한 목적으로도 의료 분야에서 유용하게 활용할 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 한국원자력연구원 첨단방사선연구소 시설운영 과제 및 자체연구개발사업의 지원을 받아 수행되었음.

참고문헌

1. Prakash D and Kotian RP. 2025. Ch. 2. In: Fundamentals of X-ray Imaging. Springer Singapore.
2. Rogers TW, Jaccard N, Morton EJ and Griffin LD. 2016. Automated X-ray image analysis for cargo security: Critical review and future promise. *Journal of X-Ray Science and Technology*. **25**(1):33-56. https://doi.org/10.3233/XST-160606.
3. Wang X, Wang Z, Xu Z, He L, Sun L and Liu P. 2025. High-resolution X-ray imaging technologies for non-destructive testing of integrated circuits (in press). Nano Materials Science. https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2025.09.014.
4. Lamberti C and van Bokhoven JA. 2016. Ch. 3. In: X-ray Absorption and X-ray Emission Spectroscopy: Theory and applications (eds Bokhoven JA and Lamberti C). John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK.
5. Wiedemann H. 2015. Ch. 25 & 26. In: Particle Accelerator Physics. Springer Cham.
6. https://photon-science.desy.de/
7. Kim C, Park SJ, Min CK, Hu J, Kim SH, Joo Y, Heo H, Kim DE, Lee S, Kang HS, Ko IS, Chae M and Lee J. 2022. Review of technical achievements in PAL-XFEL. *AAPPS Bull*. **32**, 15. https://doi.org/10.1007/s43673-022-00045-4.
8. Hoheisel M, Lawaczeck R, Pietsch H and Arkadiev V. 2005. Advantages of monochromatic X-rays for imaging. Medical Imaging 2005: Physics of Medical Imaging. Proc. SPIE 5745. https://doi.org/10.1117/12.593398.
9. Paganin DM and Pelliccia D. 2021. Ch. 2, X-ray phase-contrast imaging: a broad overview of some fundamentals. In: Advances in Imaging and Electron Physics (Vol. 218).
10. Song Y. 2018. A Review of Common Beam Hardening Correction Methods for Industrial X-ray Computed Tomography. Sains Malaysiana. https://doi.org/10.17576/JSM-2018-4708-29.
11. Carroll FE. 2002. Tunable monochromatic X rays: a new paradigm in medicine. *AJR Am J Roentgenol.* **179**(3):583-90. https://doi.org/10.2214/ajr.179.3.1790583.
12. Silver EH, Shulman SD and Rehani MM. 2021. Innovative monochromatic X-ray source for high-quality and low-dose medical imaging. *Med Phys*. **48**(3):1064-1078. https://doi.org/10.1002/mp.14677.
13. Fisher S, Roques-Carmes C, Rivera N, Wong LJ, Kaminer I and Soljačić M. 2020. Monochromatic X-ray source based on scattering from a magnetic nanoundulator. *ACS Photonics*. 20;**7**(5):1096-1103. https://doi.org/10.1021/acsphotonics.0c00121.
14. Dassault Systèmes, “CST Studio Suite”, version 2019.