

## &lt;원저&gt;

## 격자 간섭계에서 탈봇 패턴의 섬광체 스크린 투과 시 전달 특성에 대한 시뮬레이션 연구

김대승·김영주·이세호·이승욱

부산대학교 기계공학부

## A Simulation Study on the Transfer Characteristics of the Talbot Pattern Through Scintillation Screens in the Grating Interferometer

Kim Daeseung·Kim Youngju·Lee Seho·Lee Seung Wook

School of Mechanical Engineering, Pusan National University

**Abstract** Grating interferometry based imaging technology is a kind of radiation imaging system, which can acquire not only absorption image but also phase difference and dark field image using the Talbot pattern. However, because of the technological difficulties and high cost of fabricating the gratings that make up the system, much efforts are being made to look for ways to replace them. This is a preliminary study to see how the Talbot pattern transfer through various kinds of scintillators and if the optical grating can be a way to replace the conventional absorption gratings. The geometry of the interferometer, the scintillator model, and the scintillator thickness are the main inputs for our simulation. We have used the concept of modulation for quantitative analysis of the contrast ratio of the Talbot pattern. This research is expected to provide very useful information on the design of optical gratings, which is an alternative way to analyze the Talbot pattern, which we have filed a patent on.

**Key Words:** Grating interferometer, Scintillator characteristic, Contrast, Modulation, Modulation transfer function

**중심 단어:** 격자 간섭계, 섬광체 특성, 대조비, 모듈레이션, 변조전달함수

## 1. 서 론

x선과 중성자는 물체를 파괴하지 않고 내부를 볼 수 있는 비파괴 검사에 사용되는 방사선이다. 일정한 방향으로 진행하는 방사선은 물질과 상호작용하여 에너지를 일부 잃게 된다. 잃어버린 에너지의 양은 물체의 두께와 감쇠계수(attenuation coefficient)에 따라 달라지는데 물체가 두꺼울수록, 감쇠계수가 클수록 입자가 투과되는 정도가 줄어든다. 이 원리를 이용하여 물체 내부의 구조를 영상화하여 가시화할 수 있다[1]. 이런 특성을 갖는 방사선 영상기술은 의료 및 산업 분야 등 다양한 곳에서 활용되고 있다[2,3,4].

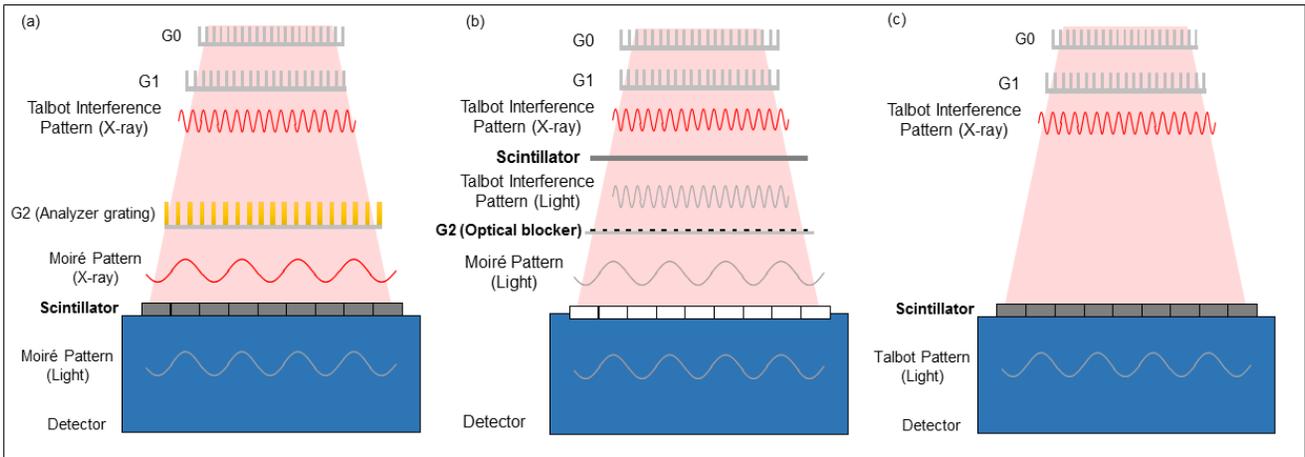
방사선 영상 기술은 여러 분야에서 사용되며 그에 관련한 다양한 기술이 개발되었다. 그 중 격자 간섭계 영상 시스템은 기존의 영상 시스템에 격자를 사용하는 시스템으로, 격자의 간섭효과로 생긴 탈봇 신호[5,6]를 이용해 다양한 정보를 얻을 수 있다. 격자 간섭계 영상 시스템은 기존의 흡수 영상뿐만 아니라 위상차 영상과 다크 필드 영상을 얻을 수 있다[7-9]. 위상차 영상은 물체를 투과한 선원의 위상 차이를 가시화해서 물체의 경계면을 명확하게 구분하는 장점이 있고, 다크 필드 영상은 물체의 구조 및 산란 정보에 따라 육안으로는 확인하기 힘든 영상을 가시화할 수 있다. 이러한 여러 장점 덕에 격자간섭계 기반 영상 기술은 차세대 영

This work was supported by a 2-year Research Grant of Pusan National University

Corresponding author: Seung Wook Lee, School of Mechanical Engineering, Pusan National University, 2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan, 46241, Republic of Korea / E-mail: seunglee@pusan.ac.kr

Received 25 January 2019; Revised 20 February 2019; Accepted 25 February 2019

Copyright ©2019 by The Korean Journal of Radiological Science and Technology



**Fig. 1.** (a) Grating interferometer system structure with a conventional absorption grating, (b) Grating interferometer system with an optical blocker after a scintillator screen, and (c) Grating interferometer geometry with no analyzer grating

상 기술로 자리매김하고 있으며 다양한 분야에서 사용되고 있다[10].

격자 간섭계 영상 시스템에서 위상차 영상과 다크 필드 영상을 얻기 위해서는 좋은 모아레 패턴(신호)을 갖추어야 한다. 모아레 패턴은 탈봇 신호가 해석격자를 지나며 생기는 신호를 말하며 모아레 신호 역시 탈봇 신호처럼 밝고 어두운 부분이 주기적으로 나타나기 때문에 모아레 패턴이라고 한다. 모터 스테이지를 이용하여 격자나 물체를 조금씩 움직이며 촬영하는 스테핑이라는 과정을 거쳐 모아레 패턴을 분석하여 위상차 영상과 다크 필드 영상을 얻을 수 있기 때문에 높은 대조비의 모아레 패턴을 얻어야 한다[11,12]. 높은 대조비를 얻기 위해서는 높은 종횡비를 갖는 해석격자가 필요하지만, 수  $\mu\text{m}$  간격에 수십 수백 배 높이의 방사선 흡수물질을 가진 해석 격자를 만드는 것은 기술적으로 매우 어렵고 그렇기에 비용이 많이 든다. 또한, 종횡비가 높게 되면 관심 영역의 크기가 줄어드는 그림자 효과를 동반한다는 점도 고려해야 한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 현재 다양한 연구가 진행되고 있다.[13]

Fig. 1(a)에서는 기존의 격자간섭계 구조를 보여주고 있는데, 방사선 선원격자(G0), 위상격자(G1)로부터 방사선 탈봇 패턴이 생기고 이를 흡수 해석 격자(G2)로 해석하여 섬광체를 통해 영상화하는 방식이다. 여기서는 위에서 언급한 고종횡비에 따른 문제점이 있는데, 이를 해결하기 위해 Fig. 1(b)와 같이 위상격자(G1) 이후에 섬광체를 두어 직접적으로 탈봇 패턴을 반응시키고 이로부터 나오는 광학 탈봇 패턴을 광학 해석격자로 해석하는 방식을 본 연구그룹에서 제안하고 특허를 출원하였다.[14]

본 연구에서는 Fig. 1(b)에서 보인 광학 탈봇 패턴을 해석하기 위한 광학 흡수방식의 해석격자를 사용하는 방식의 타

당성을 확인하기 위하여, 우선적으로 Fig. 1(c)와 같이 선원 격자(G0), 위상격자(G1), 섬광체영상검출기를 사용하는 시스템에서의 시뮬레이션을 수행하고자 한다. 섬광체영상검출기에서의 광학 탈봇 신호에 영향을 줄 수 있는 요소는 많지만, 실험의 목적에 맞게 전체 시스템 거리를 일정하게 하여 격자 간섭계 구조와 섬광체 특성에 따라 탈봇 패턴의 변화를 MATLAB R2014b 버전을 통해서 시뮬레이션 하였다.

## II. 본 론

### 1. 방 법

격자 간섭계 영상 시스템은 크게 격자부와 섬광체 및 검출기부로 구성된다. 격자부에서 간섭효과로 인해 생긴 방사선 형태의 신호를 섬광체를 통해 빛의 신호로 변환하고, 변환된 신호를 검출기에서 받아들이면서 영상화 할 수 있다. 섬광체를 통해 신호를 변환할 때 신호가 뭉개지며 섬광체의 특성에 따라 그 뭉개지는 정도가 각각 다르다. Fig. 1은 기존의 격자 간섭계 영상 시스템과 제안하는 격자 간섭계 영상 시스템, 그리고 해석격자를 제외한 시스템에서 간섭계 구조와 섬광체 모델[15]에 따른 탈봇 신호의 변화를 관찰하기 위한 시스템을 간략하게 나타내었다. 모든 시뮬레이션은 코딩을 하여 MATLAB R2014b 버전을 통해 진행된다. 격자의 간섭효과로 인해 생기는 탈봇 패턴의 생성은 격자 간섭계 구조에 따라 계산한다. 섬광체 모델을 설정하고 모델과 두께에 따라 최종적으로 빛 형태의 탈봇 패턴의 대조비를 모듈레이션을 통해 정량적으로 비교할 것이다.

1) 격자 간섭계의 구조

격자 간섭계는 주로 선원격자 G0, 위상격자 G1, 해석격자 G2로 구성된다. 격자 간섭계에서 사용되는 X선은 높은 간섭성이 필요하기 때문에 동일한 방향의 선원을 갖도록 마이크로 초점을 사용한다. X선은 격자들을 지나며 간섭을 일으키게 되고 탈봇 패턴이 공간상에 나타나게 된다. 탈봇 패턴은 선원의 세기나 격자의 주기 및 거리 등 다양한 조건에 의해 영향을 받기 때문에 이 실험에서는 격자 사이의 총 거리, 즉 선원격자(G0)부터 해석격자(G2)까지의 거리를 일정하게 둔 상태에서 위상격자(G1)를 이동시켜가며 격자 간섭계 구조를 3가지로 나누었다. 그에 따라 일반 구조, 대칭 구조, 역 구조로 분류했고 그 기준은 선원격자와 위상격자의 거리 L1과 위상격자와 해석격자의 거리 L2의 길이를 비교해 정한다. Fig. 2는 일반적인 격자 간섭계를 격자의 거리에 따라 분류한 그림이다. Fig. 2의 (a)와 같이 거리 L1이 L2보다 크면 일반 구조, (b)처럼 L1이 L2와 같으면 대칭 구조, (c)처럼 L1이 L2보다 작으면 역 구조라고 한다.

Table 1은 격자 전체 거리를 고정하고 일반 구조, 대칭 구조, 역 구조에 따라 각각 실험 파라미터를 정리한 값이다. 격자 전체 거리(L1+L2)는 988 mm로 동일하며, 유효 에너지(Effective energy)는 28 keV이고 탈봇 차수(Talbot order)는 3차이며 위상 천이(Phase shift)는  $\pi$ 이다. 탈봇 패턴이 일어나는 조건을 설정하기 위해 구조별 격자들의 주기 값을 설정한다.

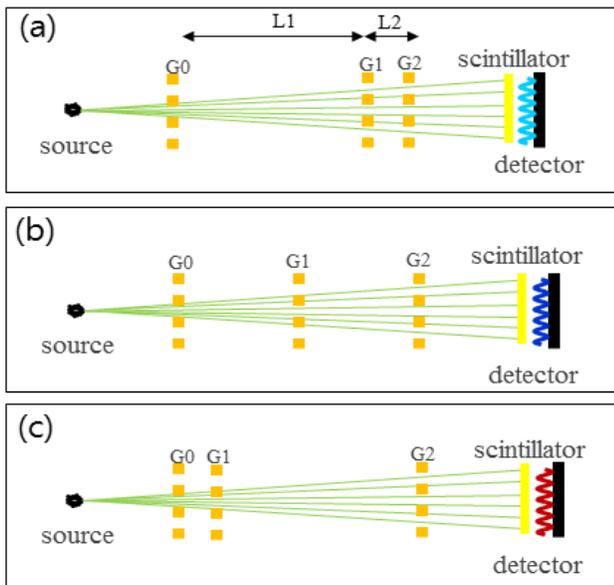


Fig. 2. Classification of grating interferometers by their geometry: (a) the conventional geometry, (b) the symmetric geometry, and (c) the inverse geometry

Table 1. Parameters for the grating configurations

	Conventional Geometry	Symmetry Geometry	Inverse Geometry
Effective energy[keV]	28		
Talbot order	3		
phase shift	$\pi$		
L1+L2 [mm]	988		
L1 [mm]	955	494	38
L2 [mm]	33	494	950
p1 [ $\mu$ m]	29.05	5.4	1.08
p2 [ $\mu$ m]	1.94	5.4	2.08
p3 [ $\mu$ m]	1.00	5.4	27.0

2) 탈봇 패턴 모델

격자 구조에 따른 탈봇 패턴의 변화를 살펴보기 위해서는 먼저 탈봇 패턴을 생성하는 수식이 필요하다. 탈봇 패턴은 위상격자를 지난 이후 생성된다. 탈봇 패턴의 생성에 관한 이론 모델은 Szewc[16]의 논문을 따랐으며 그 개념도는 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. 그림은 선원 격자와 위상격자를 거치며 탈봇 패턴이 생성되는 과정을 표현하였고, 신호 생성 과정을 수학적으로 표현하기 위해 격자마다 축을 표시하였다. 선원격자를 기준으로  $L_0$ 만큼 떨어져 있는 선원으로부터 첫 번째 격자에 도달하는 파동에 관한 함수는 다음 수식으로 나타낼 수 있다.

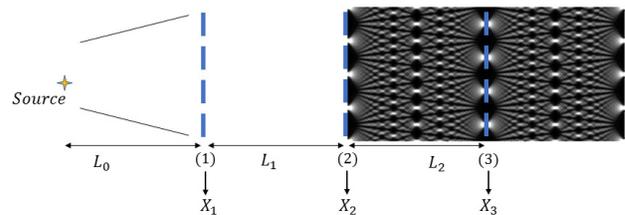


Fig. 3. Schematic of the Talbot pattern and grating interferometer

$$\psi(x_0, x_1, L_0) = e^{ik\sqrt{L_0^2 + (x_1 - x_0)^2}} \dots \dots \dots (1)$$

여기서  $k = 2\pi/\lambda_{dB}$ 이다.  $\lambda_{dB}$ 는 선원의 파장이고  $x_0$ 은 선원의 위치이며  $x_1$ 은 첫 번째 격자의 위치이다. 푸리에 급수를 이용하여 선원격자에 대한 전달함수를 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$t_1(x_1) = \sum_n A_n e^{i2\pi n \frac{x_1}{d_1}} \dots \dots \dots (2)$$

여기서  $d$ 는 격자 주기이고 푸리에 계수로 표현된  $A_n = fsinc(nf\pi)$ 이다. Fresnel-Kirchhoff 회절 적분을 사용하여 위상격자에서 생성되는 파동 방정식은 다음 식으로 표현한다.

$$\psi_2(x_0, x_1, L_0) = \int_{x_1} t_1(x_1) e^{ik\sqrt{L_0^2+(x_1-x_0)^2}} e^{ik\sqrt{L_1^2+(x_2-x_1)^2}} dx_1 \dots\dots\dots (3)$$

위 식을 정리하여 최종적으로 얻은 파동에 대한 식은 다음 식으로 표현한다.

$$\psi(\alpha, x_2, L_1') = a \sum_n A_n e^{-i\pi L_1'(\alpha+n)^2} e^{i2\pi x_2'(\alpha+n)} \dots\dots\dots (4)$$

위 식에서 변수들은 다음과 같이 정리할 수 있으며, 무차원 변수로 표현하였다.

$$L_1' = L_1 \frac{\lambda_{dB}}{d_1^2} \left(1 + \frac{L_1}{L_0}\right) \dots\dots\dots (5)$$

$$x_2' = \frac{x_2}{d_1} \left(1 + \frac{L_1}{L_0}\right) \dots\dots\dots (6)$$

$$\alpha = -\frac{d_1}{\lambda_{dB}} \frac{x_0}{L_0} \dots\dots\dots (7)$$

3) 섬광체 모델

신호를 영상화하기 위해서는 검출기에서 검출할 수 있는 형태의 신호가 필요하다. 방사선 신호를 직접 검출하는 방법이 없기 때문에 방사선 신호를 빛 신호로 변환하는 섬광체를 사용한다. 하지만 방사선 신호가 빛 신호로 변환되는 과정에서 섬광체의 특성에 따라 신호의 왜곡이 동반된다. 이런 현상이 발생하는 이유는 섬광체로 들어오는 방사선 신호에 비해 섬광체에서 나가는 빛은 퍼지기 때문이다. 따라서 방사선 신호가 섬광체를 통해 빛 신호로 변환될 때 신호의 세고 약한 차이가 뭉개지는 블러링 현상이 발생한다. 탈봇 패턴에 생기는 블러링 효과는 당연히 패턴의 대조비에 좋지 않은 영향을 끼치므로 섬광체 특성에 따라서 탈봇 패턴이 어떻게 변하는지 알아본다. 섬광체 특성을 정하기 위해 Swank의 논문[9]을 참고하여 몇 가지 섬광체 모델을 생성하고 시뮬레이션을 통해 그 결과를 살펴본다. 추가로 본 연구에서 섬광체 모델을 신호의 세기를 나타내는 수식보다

는 변조전달함수(Modulation Transfer Function)로 표현하는 방법을 선택한다. 그 이유는 탈봇 패턴 신호와 섬광체 특성에 관한 수식을 쉽게 연결하기 위해서이고, 그렇게 표현할 수 있는지 확인하는 과정은 탈봇 패턴과 섬광체 특성의 계산 부분에서 다루도록 한다.

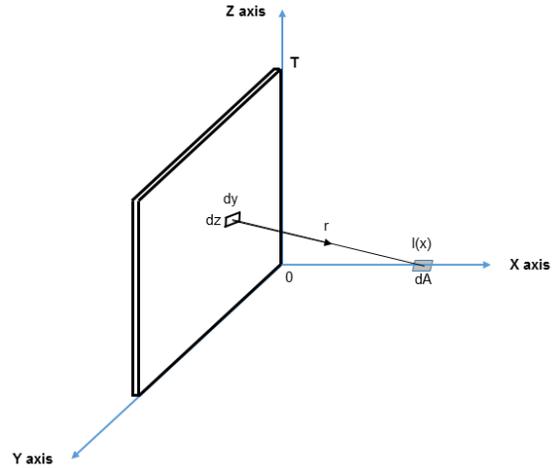


Fig. 4. Basic scintillator model

Fig. 4는 섬광체의 기본 모델을 그림으로 표현한 것이다. 섬광체의 두께는 0부터 T까지이고, 빛을 감지하는 검출기는 xy평면에 존재한다. 방사선은 양의 Z방향으로부터 들어오고 섬광체와 반응하여 생성되는 빛은 검출기에서 감지된다. 이 때 섬광체의 미소면적  $dydz$ 에서 생성된 빛이 특정 면적  $dA$ 로 들어가는 빛의 양을  $F(x)$ 로 표현하며 이 신호의 세기는 다음 (식 11)과 같이 표현할 수 있다.

$$F(x) = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{-\infty}^{\infty} \frac{z}{4\pi r^3} dydz \dots\dots\dots (8)$$

여기서 거리  $r$ 은 미소면적  $dydz$ 에서  $dA$ 까지 거리이다. 위 식을 기본 섬광체 모델을 표현하는 식으로 선정하고 이를 기반으로 추가적인 섬광체 모델에 관한 수식도 계산한다. 본 연구에서 설정한 섬광체 모델은 3가지이다. 모델은 간단하고 이상적인 경우부터 복잡하고 실제적인 특성을 추가하여 선정한다. 섬광체의 모델에 따라 신호의 결과가 어떻게 변하는지 확인한다.

(1) 균일흡수 모델(Case 1)

가장 간단한 모델로 형광체를 투과하고 광음극에서 반사가 되지 않는 경우를 가정해본다. 이런 조건은 섬광체의 기본 모델을 나타내므로 이 모델의 식은 (식 8)로 그대로 나타

낼 수 있다. 적분을 정리하면 다음과 같이 (식 9)로 나타낼 수 있다.

$$F(x) = \frac{1}{4\pi T} \ln\left(1 + \frac{T^2}{x^2}\right) \dots\dots\dots (9)$$

위 (식 9)를 푸리에 변환을 하여 주파수 영역으로 표현하면 다음 (식 10)과 같다.

$$G(\nu) = \frac{(1 - e^{-2\pi\nu T})}{4\pi\nu T} \dots\dots\dots (10)$$

(2) 지수 함수 흡수 모델(Case 2)

X선의 흡수 형태가 지수함수 형태를 따른다고 설정한 모델이다. 이 경우 변조전달함수식은 지수함수에 관한 항만 기본 수식에 곱해주면 되므로 이 모델의 변조전달함수식은 다음과 같이 (식 11)처럼 표현할 수 있다.

$$G(\nu) = \frac{1}{2} [\mu / (e^{\mu T} - 1)] [1 - e^{-(2\pi\nu - \mu)T}] / (2\pi\nu - \mu) \dots\dots (11)$$

(3) 유리가 존재하는 균일 흡수 모델(Case 3)

실제 검출기와 섬광체 사이에 존재하는 공간을 유리의 존재로 대체한 모델이다. 실제 검출부 제작에서 검출기와 섬광체를 맞닿아 붙일 수 없기 때문에 그 공간의 존재를 유리로 대체하여 모델로 설정했고, 유리의 두께에 따라서 탈봇 패턴 신호에 어떤 영향을 주는지 확인한다. 이 모델의 설정에서 유리는 D의 두께를 갖고 섬광체는 유리 다음에 위치하므로 D부터 D + T까지 T의 두께를 갖는다. 유리는 다른 특별한 영향을 주지 못한다고 가정하며 섬광체 두께를 적분의 영역으로 설정하여 계산하면 (식 12)와 같이 표현될 수 있다.

$$G(\nu) = e^{-2\pi\nu D} (1 - e^{-2\pi\nu T}) / 4\pi\nu T \dots\dots\dots (12)$$

4) 탈봇 패턴과 섬광체 특성의 계산

탈봇 신호가 섬광체를 만나 방사선 신호에서 빛 신호로 변환되는 과정을 계산할 때 두 수식의 합성곱(Convolution)을 사용한다. 각 수식은 설정한 조건이나 변수에 따라 표현하는 수식이 다를 수 있기 때문에 두 식을 직접 연산하기에는 어려운 경우가 많다. 이 문제를 해결하기 위해서 기존 식을 주파수 영역에 관한 식으로 고쳐 표현하여 수식간의 연산에 호환성을 높일 수 있다. 각 식을 주파수 영역으로 표현

하기 위해 푸리에 변환을 한 식을 변조전달함수(Modulation Transfer Function)라고 하며, 본 논문에서도 변조전달함수를 사용해서 푸리에 변환과 역 푸리에 변환으로 탈봇 신호와 섬광체 특성에 따른 최종 결과 신호를 얻는다. 위의 계산 방식은 다음 합성곱 함수와 푸리에 변환에 관한 정리를 통해 가능함을 알 수 있다.

두 함수  $f(x)$ 와  $g(x)$ 의 푸리에 변환을  $F(w)$ 와  $G(w)$ 라고 할 때, 함수  $f(x) * g(x)$ 의 푸리에 변환을 한다. 먼저 합성곱 함수 정의에 대해 살펴보면

$$f(x) * g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\lambda)g(x - \lambda)d\lambda \dots\dots\dots (13)$$

푸리에 변환의 정의에 합성곱 함수를 대입하면

$$\int_{-\infty}^{\infty} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} f(\lambda)g(x - \lambda)d\lambda \right] e^{-jw x} dx \dots\dots\dots (14)$$

괄호 안의 적분 중 해당 변수에 따른 적분 순서를 바꾸면

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(\lambda) \left[ \int_{-\infty}^{\infty} g(x - \lambda)e^{-jw x} dx \right] d\lambda \dots\dots\dots (15)$$

$x - \lambda$ 를  $m$ 으로 치환하면

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(\lambda) \left[ \int_{-\infty}^{\infty} g(m)e^{-jw(m + \lambda)} dm \right] d\lambda \dots\dots\dots (16)$$

식 안의 지수 함수를 나누어 적분 함수의 곱으로 표현할 수 있다.

$$\left[ \int_{-\infty}^{\infty} f(\lambda)e^{-jw\lambda} d\lambda \right] \left[ \int_{-\infty}^{\infty} g(m)e^{-jwm} dm \right] \dots\dots\dots (17)$$

위의 식은 각각  $F(w)$ ,  $G(w)$ 가 되므로 공간 영역에서의 합성곱 함수의 값은 주파수 영역에서의 곱하기와 같다는 것을 알 수 있다. 따라서 섬광체 특성에 해당하는 함수와 탈봇 신호에 해당하는 함수 모두 푸리에 변환을 하여 계산한 후에 역 푸리에 변환을 통해 결과 값을 얻도록 한다.

5) 신호 분석 및 처리방법

격자 간섭계 구조와 섬광체 특성을 바꿔가며 얻는 최종 신호의 대조비를 정량적으로 표현하기 위해서는 한 눈에 알

아볼 수 있는 지표가 필요하다. 최종적으로 얻은 탈봇 신호는 간섭효과의 영향으로 최댓값과 최솟값이 주기적으로 나타나는 정현파의 형태로 나타난다. 이 때 신호의 최댓값과 최솟값을 이용하여 탈봇 신호가 표현할 수 있는 대조비의 크기를 모듈레이션이라는 개념을 이용하여 나타낸다.

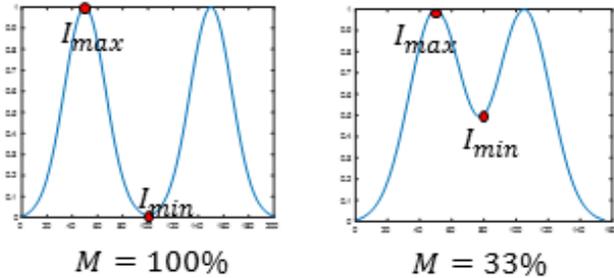


Fig. 5, Modulation

Fig. 5는 주기적인 신호의 일부 구간을 나타내고 모듈레이션의 개념을 적용하여 대조비를 구한 그림이다. 모듈레이션은 최댓값과 최솟값으로 나타낼 수 있는 값의 크기를 비율을 통해 나타내며 신호의 최댓값과 최솟값의 차를 최댓값과 최솟값의 합으로 나누어 계산하며 이를 eq. 18에 나타내었다.

$I_{max} - I_{min}$  값이 크고, 동시에  $I_{max} + I_{min}$  값이 작을수록 모듈레이션 값이 커지고 그 수는 항상 0과 100사이의 값을 갖는다. 이 수가 나타내는 의미는 특정한 구간 내에서 신호의 세기를 말하는 것이 아니라 대조비, 즉 백분율(%)을 표현하는 것으로 생각할 수 있다. 이로써 여러 실험 조건에 따라 나오는 탈봇 패턴의 대조비를 모듈레이션을 활용하여 정량적으로 비교할 수 있다. 또한 간섭계 구조에 따라 나오는 신호는 대조비를 분석하기 위해 각각 평준화를 하여 신호의 대조비에 집중할 수 있도록 한다.

$$M = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \dots\dots\dots (18)$$

### III. 결 과

#### 1. 간섭계 구조에 따른 탈봇 신호

Fig. 6은 3가지 간섭계 구조에 따른 탈봇 패턴 신호를 각각 4주기씩 나타낸 그림이다. 이는 방사선 신호가 격자 간섭계를 지나면서 만들어지는 신호이며, 각 신호는 섬광체의

특성에 영향을 받지 않은 온전히 간섭계 구조에 의해 만들어진 형태이다. 그림 (a) (b) (c)는 순서대로 일반 구조 (Conventional geometry), 대칭 구조(Symmetry geometry), 역 구조(Inverse geometry)이다. 그림의 가로축은 해당 신호의 주기로 나타내었고 세로축은 신호의 상대적 세기 (Relative intensity)로 나타낸다. 신호의 크기를 절댓값으로 나타내지 않고 표준화하여 나타낸 이유는 각 신호별 탈봇 패턴의 대조비를 쉽게 파악하기 위한 조치이다. 신호의 상대적 세기는 각 신호의 주기가 해석격자의 주기와 일치하는 것을 확인할 수 있다. 신호의 차이가 발생하는 파라미터인 격자 거리 및 격자 주기 등 간섭계 구조에 관한 세부정보는 Table 1에 나타내었고, 탈봇 패턴 모델은 파동에 관한 함수로 표현하여 MATLAB R2014b를 통해 계산하여 그래프로 나타내었다.

#### 2. 섬광체 모델에 따른 탈봇 신호

이 실험의 목적은 간섭계 구조를 통해 생성된 탈봇 신호가 섬광체를 통해 방사선에서 빛 신호로 변화할 때 신호의 형태가 어떻게 바뀌는지 확인하는 실험이다. 간섭계 구조는 일반 구조, 대칭 구조, 역 구조에 대해서 각각 진행하며 섬광체 모델 3가지에 대해 진행한다. 섬광체 모델은 균일 흡수모델, 지수 함수 흡수모델, 유리가 존재하는 균일 흡수모델로 선정했고 모델에 대한 설명은 섬광체 모델 부분에서 다루었다. 3가지 모델에서 기본 파라미터는 동일하게 설정하고 각 모델마다 들어가는 추가적인 파라미터는 다음과 같다. 섬광체의 두께는 10  $\mu\text{m}$ 로 동일하게 설정하고 2번 모델에서 선형감쇠계수는 0.1 [ $\mu\text{m}^{-1}$ ]로 설정하였으며 3번 모델에서 유리의 두께는 5  $\mu\text{m}$ 로 설정한다.

Fig. 7은 간섭계 구조에 따라 각각 3가지 섬광체 모델을 적용시켰을 때 생성되는 탈봇 신호의 모습이다. 각 구조별 그래프의 주기는 앞서 보았던 간섭계 구조에 따른 탈봇 신호의 주기와 동일하다. 역 구조, 대칭 구조, 일반 구조 순서로 탈봇 패턴의 대조비가 높다는 점을 확인할 수 있다. 선원을 팬 빔으로 설정했기 때문에 탈봇 신호의 세기가 중앙에서 가장자리로 갈수록 약해지는 점을 볼 수 있다.

일반 구조에서 섬광체 모델에 따른 탈봇 신호들은 그래프를 통해 약간의 차이를 볼 수 있지만 모듈레이션 값은 1.9%, 1.2%, 0%로 나오며, 이런 수치는 사실상 탈봇 신호로서의 역할을 하지 못한다고 할 수 있다. 대칭 구조에서는 일반 구조보다 탈봇 신호의 모습이 더 잘 나타나며 모듈레이션 값은 31.0%, 26.9%, 13.7%이다. 그러나 육안으로 볼 때 섬광체 모델 3번의 경우에는 일정한 주기의 패턴이 나타나지 않

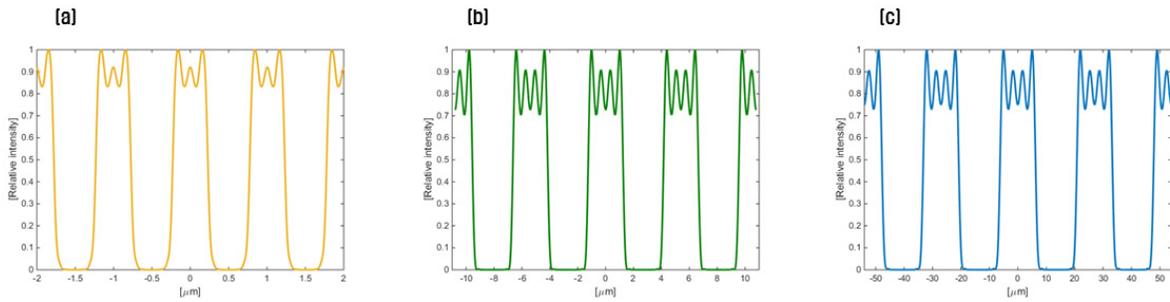


Fig. 6. Talbot signal by interferometer structure.  
 (a) conventional geometry, (b) symmetry geometry, (c) inverse geometry

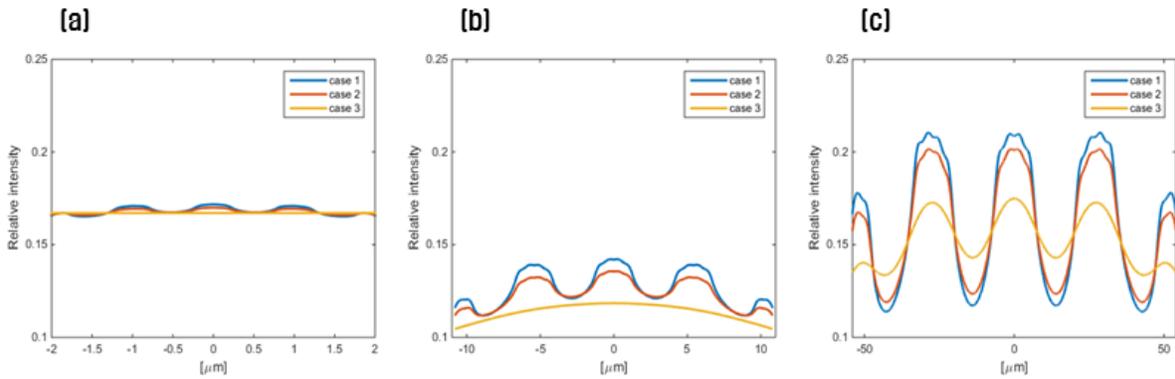


Fig. 7. (a) Talbot signal by scintillator model in conventional geometry, (b) symmetry geometry, (c) inverse geometry

으므로 13.7%의 모듈레이션 값이 나왔다고는 하나 탈봇 신호로서 의미는 없다. 마지막으로 역 구조에서는 일반 구조나 대칭 구조와는 다르게 모든 모델에서 각각 일정한 주기를 갖는 탈봇 패턴의 형성을 확실히 볼 수 있었고, 모듈레이션 값은 각각 42.4%, 39.8%, 29.6%이다. 세 가지 간섭계 구조에서 모두 이상적인 조건에서 현실적인 조건을 반영하는 모델일수록 모듈레이션 값이 작아지는 것을 확인했다.

### 3. 섬광체 두께에 따른 탈봇 신호

간섭계 구조에 의해 생성된 탈봇 신호가 섬광체 두께에 따라 최종 탈봇 신호의 대조비를 확인하는 실험이다. 위 실험과 마찬가지로 일반 구조, 대칭 구조, 역 구조의 간섭계 구조에서 생성된 탈봇 신호와 섬광체의 두께가 각각 5  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$ , 15  $\mu\text{m}$ , 20  $\mu\text{m}$ 일 때 생성되는 최종 탈봇 신호를 Fig. 8에 나타내었다. 이 실험에는 섬광체 모델 3번을 사용했는데 그 이유는 현실적인 환경 조건을 적용하기 위해서이다. 앞선 실험과 마찬가지로 일반 구조에서, 대칭 구조, 역 구조로 갈수록 신호의 대조비가 큰 것을 확인할 수 있다. 이 때 일반 구조와 대칭 구조에서 신호의 패턴이 나타나지 않는 이유는 탈봇 신호가 많이 불명확해지는 특성을 가지고 있는

모델 3번의 영향으로 생각된다. 또한 섬광체의 두께가 두꺼워 질수록 모듈레이션 값이 줄어드는데, 역 구조의 경우 섬광체 두께가 5  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$ , 15  $\mu\text{m}$ , 20  $\mu\text{m}$ 로 증가하면 모듈레이션 값은 34.1%, 29.6%, 26.3%, 23.7%로 감소하는 결과가 나왔다. 섬광체 두께가 커질수록 모듈레이션 값이 줄어드는 이유는 섬광체의 특성 때문이라고 생각한다. 섬광체로부터 나오는 빛의 방향은 입사하는 방향과 동일한 방향으로 한정되지 않고 여러 방향으로 진행하기 때문이다. 따라서 섬광체에서 나오는 빛의 방향을 제어할 수 있다면 블러링 효과를 줄여 신호의 대조비를 키울 수 있을 것이다.

일반적으로 섬광체가 두꺼워지면 블러링 효과로 인해 모듈레이션 값은 작아지지만 빛의 세기는 더 커지게 된다. 하지만 이 실험에서 섬광체의 두께가 두꺼워져도 빛의 세기가 더 커지지 않는다는 점을 Fig. 8(c)를 통해 확인할 수 있다. 이 결과는 예상하지 못한 부분이었으며 그 원인을 찾기 위해 계산 과정을 추적하여 한 가지 이유를 생각할 수 있었다. 변조조달함수는 거리에 따라 얼마나 물체를 잘 구분해내는지를 나타내는 그림이다. 섬광체 모델 특성에 관한 수식을 주파수 영역인 변조조달함수로 바꾸어 계산하고 역변환을 하는 과정에서 신호의 크기에 관한 정보가 사라졌다고 생각한다.

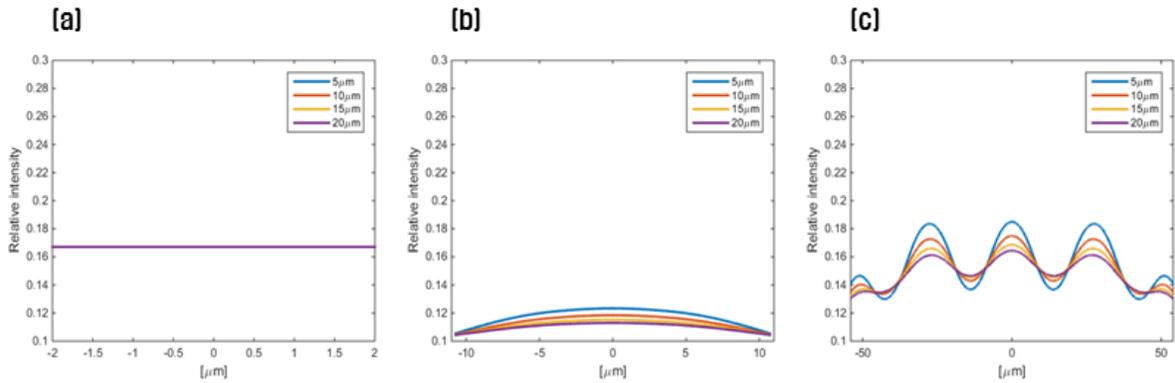


Fig. 8. (a) Talbot signal by scintillator thickness in conventional geometry, (b) symmetry geometry, (c) inverse geometry

### IV. 고찰

본 연구는 기존 격자 간섭계가 갖는 단점을 보완하기 위해 이를 대체할 새로운 시스템의 가능성을 판단하기 위해 진행한 탈봇 패턴의 섬광체 투과시 전달 특성에 대한 시뮬레이션 연구이다. 새로운 시스템은 이미 특허로 발표하여 이 실험을 통해서 시스템을 구성하는 격자나 섬광체 등에 요구되는 물성치의 수준이나 섬광체영상검출기에 나타나는 탈봇 패턴의 대조비를 미리 살펴볼 수 있다. 이번 연구를 통해 탈봇 패턴의 높은 대조비를 얻기 위한 간섭계 구조, 섬광체의 특성에 대한 정보를 파악했고 실험 조건을 바꾸면서 얻는 패턴의 대조비 또한 알 수 있었으며 이를 Table 2로 나타내었다. 이 표를 통해 한 눈에 모듈레이션 값의 경향성을 파악 할 수 있었다. 이 결과는 알려진 기존의 내용과 당연히 일치하였으나, 계산 과정에서 생각하지 못한 이유로 신호의 양에 대한 정보가 일부 누설되었음을 확인하였다. 정확한

분석을 위해서는 시뮬레이션을 하기 위해 단순화시키거나 고려하지 않았던 요소들을 추가해야 하고 계산 과정 또한 검토가 이루어져야 할 것이다.

### V. 결론

이번 연구는 간섭계 구조와 섬광체 특성에 따라 탈봇 신호가 어떻게 생성되는지 확인하고 패턴의 대조비를 비교하는 실험이다. 따라서 간섭계 구조와 섬광체 특성을 변화시키는 파라미터나 모델, 두께 등을 설정하여 시뮬레이션을 진행했다. 최종적으로 얻는 신호를 평가하기 위해 모듈레이션 개념을 도입하고 수치를 통해 대조비를 확인할 수 있도록 했다. 격자 간섭계 구조와 섬광체 모델 그리고 두께에 따라 모듈레이션을 측정할 값을 정리하였다. 이를 활용하면 탈봇 신호에 영향을 주는 조건을 어떻게 바꾸는지에 따라

Table 2. Modulation of Talbot signal by scintillator characteristic model, scintillator thickness

Talbot Signal	Thickness(μm)	Case 1 (%)	Case 2 (%)	Case 3 (%)
Conventional Geometry	5	3.8	3.1	0
	10	1.9	1.2	0
	15	1.3	0.6	0
	20	1.0	0.3	0
Symmetry Geometry	5	42.4	40.3	18.6
	10	31.0	26.9	13.7
	15	23.8	17.7	10.5
	20	18.9	11.5	8.3
Inverse Geometry	5	49.9	49.1	34.1
	10	42.4	39.8	29.6
	15	36.9	32.4	26.3
	20	32.9	26.6	23.7

모듈레이션 값의 변화를 파악할 수 있어 탈봇 신호의 경향성을 한 눈에 알기 쉽다. 먼저 간섭계 구조에서 일반 구조, 대칭 구조, 역 구조로 갈수록 대조비가 높다. 섬광체 모델에서는 1번 모델, 2번 모델, 3번 모델로 갈수록, 두께가 두꺼워질수록 대조비가 낮아진다. 따라서 가장 큰 대조비를 얻을 수 있는 조건은 역 구조를 갖는 격자 간섭계를 사용하고, 섬광체 모델이 단순하며 섬광체의 두께가 얇을 때이다.

또한 섬광체 두께에 따른 탈봇 신호에서 섬광체 두께가 커도 신호의 세기가 작다는 점을 확인했는데 이런 결과가 나타나는 이유는 변조전달함수를 사용하여 계산하는 과정에서 신호의 형태에 관한 정보만 변환되고 세기에 관한 정보는 소실되었을 가능성을 염두하고 있다.

※ 이 논문은 2018년 부산대학교 석사학위논문에서 일부 발췌되어 작성되었음.

## REFERENCES

- [1] Röntgen WC. On a new kind rays. Science New Series. 1896;3(59):227-31.
- [2] Wen H, Bennett EE, Monica MH, Rapacchi S. Fourier X-ray scattering radiography yields bone structural information. 2009;251(3):910-8.
- [3] Stutman D, Beck TJ, Carrino JA, Bingham CO. Talbot phase-contrast X-ray imaging for the small joints of the hand. Institute of Physics and Engineering in Medicine. 2011;56.
- [4] Oh O, Lee SW. Comparison Study on Projection and Backprojection Methods for CT Simulation. Journal of Radiological Science and Technology. 2014;37(4): 323-30.
- [5] Talbot HF. Facts relating to optical science. Philosophical Magazine and journal of science. 1836;9(56).
- [6] Kim Y, Oh O, Kim J, Lee SW. Study on Talbot pattern for grating interferometer. Journal of Radiological Science and Technology. 2015;38(1):39-49.
- [7] Fitzgerald R. Phase-sensitive X-ray imaging. Physics Today. 2000;53(7):23-6.
- [8] Momose A. Recent advances in X-ray phase imaging. Japanese Journal of Applied Physics. 2005;44:6355-67.
- [9] David C, Nõhammer B, Solak HH, Ziegler E. Differential x-ray phase contrast imaging using a shearing interferometer. Applied Physics Letters. 2002;81(17)
- [10] Bech M. X-ray imaging with a grating interferometer [Ph.D thesis]. University of Copenhagen; 2009.
- [11] Mohr J, Grund T, Kunka D, Kenntner J, Leuthold J, Meiser J. High aspect ratio gratings for X-ray phase contrast imaging. AIP Conference Proceedings. 2012;1466(41).
- [12] Tiwari P, Mondal Puspen, Srivastava AK, Naik PA. Fabrication of high aspect ratio submicron gratings on ~100nm titanium membranes using electron beam lithography. AIP Conference Proceedings. 2017;1832.
- [13] Kim Y, Kim J, Kim D, Hussey D, Lee SW. Review of scientific instruments. 2018;89 033701.
- [14] Lee SW. et al. Korean patent file no. 10-2018-0008924.
- [15] Swank RK. Calculation of modulation transfer functions of X-ray fluorescent screen. Applied Optics. 1973;12:1865-70.
- [16] Szewc C. Molecule interference in the near-field Talbot regime [Ph.D thesis]. University of Southampton; 2012.