3차원 레이저 스캐너용 ND 필터의 시뮬레이션
Simulation of ND Filter for Terrestrial Laser Scanner

양수효[1)] · 오동근[2)] · 정중연[3)]
Yang, Soo Hyo · Oh, Dong Geun · Jeong, Joong Yeon

[1)] (주)이오시스템 연구원(E-mail:handshaking82@eosystem.com)
[2)] (주)이오시스템 주임연구원(E-mail:dgoh@eosystem.com)
[3)] (주)이오시스템 연구위원(E-mail:jjyjeong@eosystem.com)

Abstract

The terrestrial laser scanner measures the signal delay time of electronic circuit in EDM(Electronic Distance Measurement) Module for distance measurement. To measure signal delay time precisely, transmitting laser beam of terrestrial laser scanner is divided optically. Therefore, 10% of the laser beam power is entered into the electronic circuit and the others go out through lens. But, measure of delay time is severe in the laser scanner system that the laser beam power is changed dynamically by reflectance of a object, because characters like gain of electronic circuit involving APD(Avalanche Photo Diode) and so on are changed by incident laser beam. Therefore, we adapt ND(Neutral Density) filter that has grid pattern to the laser scanner system to keep constant the incident laser beam power. In this paper, we propose the simulation program for efficient design of ND filter pattern. Finally, to affirm simulation program, we conduct the experimental test of simulated ND filter that has linearly transmittance change, and we consider the experiment result.

1. 서 론

3차원 레이저 스캐너는 대상물의 3차원 공간 정보(레이저 스캐너에서의 직선거리, 방위각, 고도각)를 비접촉적으로 신속, 정밀하게 측정 및 취득할 수 있는 장비로써 문화재의 3차원 측정에서 구조물의 변위량 측정 등 다양한 분야에서 활용되고 있다(이인수, 2007 ; 추창우 등, 2007). 3차원 레이저 스캐너에서는, 스캐너에서 대상물까지의 직선 거리간격과 방위각, 고도각의 정밀, 정확한 측정이 요구된다. 여기서, 거리간격은 펄스레이저의 왕복시간으로 측정하고 있으며, 방위각 및 고도각은 3차원 레이저 스캐너를 움직이는 서보모터의 엔코더에서 산출하고 있다.

(주)이오시스템에서 개발 중인 3차원 레이저 스캐너 시스템(지능형국토정보기술혁신사업, 과제번호:07국토정보C02-2-2-03)에서는, 보다 정확한 거리 측정을 위하여 거리 측정 모듈 전자회로의 신호 지연시간을 정밀하게 측정하고 있다. 이를 위해서, 대물렌즈를 통해 대상물에 송수신 되는 레이저 빔 파워와 거리 측정 모듈에 직접 입사되는 레이저 빔 파워를 같은 크기로 맞추기 위해 전자적, 광학적으로 제어하고 있다. 이는, 거리 측정 모듈에 입사되는 레이저 빔 파워의 변화에 따라 APD(Avalanche Photo Diode)를 포함한 전자회로의 증폭 등이 변화

하기 때문에, 동일한 광전 신호 크기에 따른 신호 지연 시간의 정밀한 측정을 위해서이다.

여기서, 거리 측정 모듈에 직접 입사되는 레이저 빔 파워의 광학적인 제어를 하기 위하여, 3차원 레이저 스캐너용 ND(Neutral Density)필터를 적용하였다. 따라서 3차원 레이저 스캐너에 적합한 ND필터를 효율적으로 설계하기 위해 ND필터 시뮬레이션 프로그램이 필요하다.

이 보고서에서는, 최적의 투과율 변화량을 가지는 ND필터의 설계를 위하여, 격자 무늬의 패턴을 응용한 ND 필터의 투과율 시뮬레이션 프로그램에 대하여 서술한다. 마지막으로, 선형적 투과율 변화를 가지는 ND필터를 설계한 후, ObjectARX를 활용하여 AutoCAD 도면으로 작성한 ND 필터에 대한 실험을 행하였다. 그리고, 작성한 ND필터의 실험 결과를 통하여, ND필터 시뮬레이션에 대하여 고찰한다.

2. 3차원 레이저 스캐너 시스템

2.1 3차원 레이저 스캐너

3차원 레이저 스캐너에서는 대상물까지의 거리, 방위각, 고도각의 비접촉적 측정이 가능하다. 펄스 레이저를 송수신하여 레이저가 왕복한 시간간격의 측정으로 거리를 산출하고, 레이저 스캐너를 움직이는 서보 모터의 엔코더에서 고도각과 방위각을 산출한다.

(주)이오시스템에서 개발 중인 3차원 레이저 스캐너 시스템(이후, 3차원 레이저 스캐너로 칭함)에서는, 하나의 펄스 송신 레이저 빔 파워를 광학적으로 분리하여, 레이저 빔 파워의 10%를 전자회로의 수신부에 입사 시키고, 동시에 나머지 90%의 파워의 레이저 빔을 대물렌즈를 거쳐 대상물에 송신하고 있다(그림 1.). 이는, 시간에 따라 유동적으로 변하는 거리 측정 모듈 전자회로의 신호 지연시간을 고려한 신속한 거리 측정을 위한 것이다. 또한, 거리 측정 모듈 전자 회로의 신호 지연시간의 정밀 측정 정도를 보장하기 위해서는, 전자회로에 직접 입사 되는 레이저 빔 파워와 대물렌즈를 통해 수신 되는 레이저 빔 파워를 동일하게 유지 시켜 주어야 한다.

여기서, 3차원 레이저 스캐너에서는 대물렌즈를 통한 송신 레이저 빔 파워는 능동적으로 전자적 제어를 하고 있기에, 전자회로에 직접 입사되는 10%의 송신 레이저 빔 파워의 다이나믹한 변화에 대해서는 수동적인 제어를 할 수 밖에 없다.

따라서, 거리 측정 모듈 전자회로의 신호 지연시간을 정밀하게 측정하기 위해서는 송신 레이저 빔 파워의 변화에도, 전자 회로에 입사되는 레이저 빔 파워를 일정하게 제어 할 수 있는 수동적 제어 시스템이 필요하다. 여기서, 광학적으로 레이저 빔 파워를 제어하기 위하여, ND필터를 적용하였다.

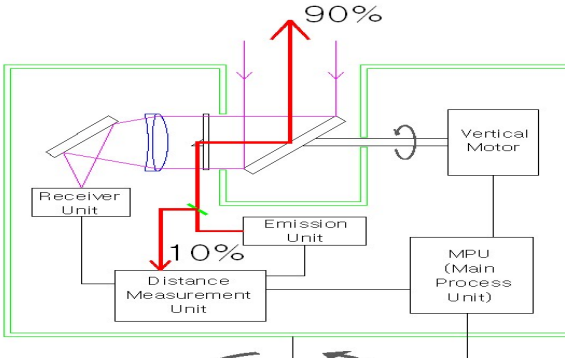


그림 1. 3차원 레이저 스캐너의 시스템

2.2 ND(Neutral Density)필터의 개요

ND필터란 광학적으로 빛의 강도를 제어하는 필터로, 파장의 의존성이 거의 없다. 3차원 레이저 스캐너에 적용하는 ND필터는 흡수형 원형가변 ND필터로, 검은색 패턴의 조합으로 ND필터의 회전 각도에 따라 레이저 빔의 투과율이 다르도록 설계되어진다(그림 2.).

또한, 적외선 레이저를 사용하는 시스템에 있어서의 ND필터에서는 격자무늬의 패턴이 많이 사용되어진다. 이는, ND필터의 패턴의 광학적 필터링 효과를 고려한 것으로, 격자 무늬가 배경방사 노이즈에 대한 필터의 효과가 우월하기 때문이다(赤外線技術硏究會, 1991).

따라서, 현재 개발 중인 3차원 레이저 스캐너에 사용되는 ND필터는 검은색 격자무늬의 패턴을 응용하여 설계 및 시뮬레이션 하였다.

그림 2. 흡수형 원형 가변 ND필터의 예(Asahi Spectra USA Inc)

3. ND필터 시뮬레이션

3차원 레이저 스캐너에 적합한 투과율 변화량을 가지는 ND필터를 효율적으로 설계하기 위해서는 시뮬레이션 프로그램이 필요하다. 여기의 필요성에 따라, ND필터 시뮬레이션 프로그램을 그림 3.에서와 같이 3부분의 인터페이스로 구성하였다.

① LRF(Laser Range Finder)방정식의 각 변수의 입력과 수신 레이저 빔의 파워와 투과율의 그래프

② 패턴의 간격 및 폭의 입력 및 입력된 정보에 따라 설계된 ND필터의 투과율의 그래프

③ 실제 ND필터의 패턴 모양의 간이적 디스플레이

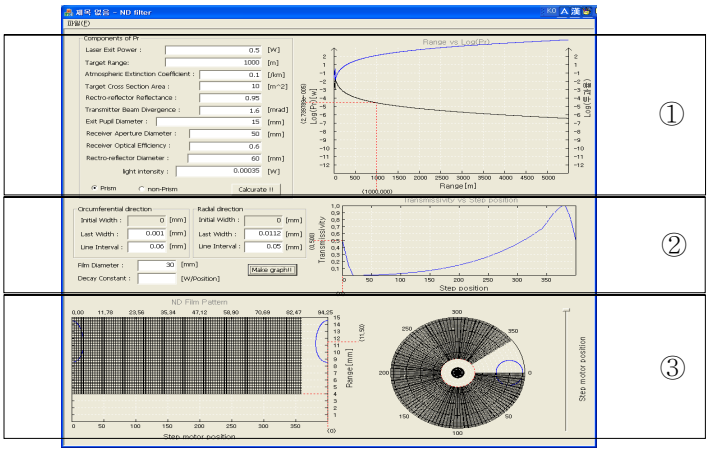


그림 3. 시뮬레이션 프로그램의 화면 구성

①에서는 3차원 레이저 스캐너에 적합한 ND필터의 투과율 변화량을 결정하기 위해, LRF 방정식을 활용하였다. 이에 따라 LRF방정식의 변수 입력 인터페이스 및 그에 따라 산출된 수신 레이저 파워, 그리고 필요한 투과율의 회전 각도에 따른 변화량을 log그래프로 표현하는 부분을 작성하였다. 여기서, 대상물의 거리 간격 및 반사율 등에 따라 변화하는 수신 레이저 빔 파워에 대한 LRF방정식은 다음과 같이 정의 된다.

$$P_R = [KP_L\eta_T][T_A][\frac{1}{\pi(\frac{\psi r}{2})^2}][A_T][2\rho\cos\theta][\frac{1}{2\pi r^2}][T_A][\pi(\frac{D_R}{2})^2][\eta_R] \quad (1)$$

P_R = Received signal power in watt

K = Beam profile function (Uniform beam K = 1)

η_T = Transmitter optical efficiency

T_A = Atmospheric transmission

ψ = Beam divergence in radians

r = Target range in meters

ρ = Hemispherical reflectance of a lambertian target surface

A_T = Target area in square meters

θ = Angle of laser incidence on lambertian target surface in radians

D_R = Receiver aperture diameter in meters

η_R = Receiver optical efficiency

②에서는 격자무늬의 패턴을 만들기 위한 반지름 방향의 패턴과 원주 방향의 패턴의 선폭 및 간격을 입력하는 인터페이스와 입력된 패턴 정보에 따라 산출된 ND필터의 투과율을 그래프로 표현하였다..

③에서는 ②에서 입력한 패턴의 정보로 ND필터의 패턴 모양을 간이적으로 표현하였다.

다음에 시뮬레이션 프로그램 개발 환경을 서술한다.

가. 시스템 : Microsoft Window XP Professional Version 2002 Service Pack 3
나. 컴퓨터 : Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU 2.33GHz, 996MB RAM
다. 개발 언어 : Microsoft Visual Studio 2005

이후에 ND필터의 목표 투과율 산출 및 패턴의 작성, 설계된 ND필터의 투과율에 대하여 서술한다.

3.1 수신 레이저 빔 파워 및 목표 투과율의 산출

3차원 레이저 스캐너에서는 레이저 빔의 송신 출력을 대상물의 빛의 반사 정도(색상, 표면의 상태 등)와 거리에 따라 다이나믹하게 변화시키고 있다. 따라서 ND필름의 투과율 변화량의 기준으로, LRF(Laser Range Finder) 방정식으로 산출한, 거리에 따른 수신 레이저 빔의 파워를 사용하였다.

LRF방정식으로 산출된 거리 x에 따른 수신 레이저 빔의 파워$P_r(x)$를 일정한 값 I_L으로 제어하기 위한 ND필터의 목표 투과율$T_r(x)$은 다음과 같이 산출하였다.

$$T_R(x) = I_L / P_R(x) \quad (\because 0 \le T_R \le 1) \tag{1}$$

그림 4.에 LRF 방정식의 각 변수 값의 입력과 함께 수신 레이저 빔 파워 및 그에 따른 필요 투과율의 그래프를 나타낸다. 단, 그래프는 log 스케일로 표현한다.

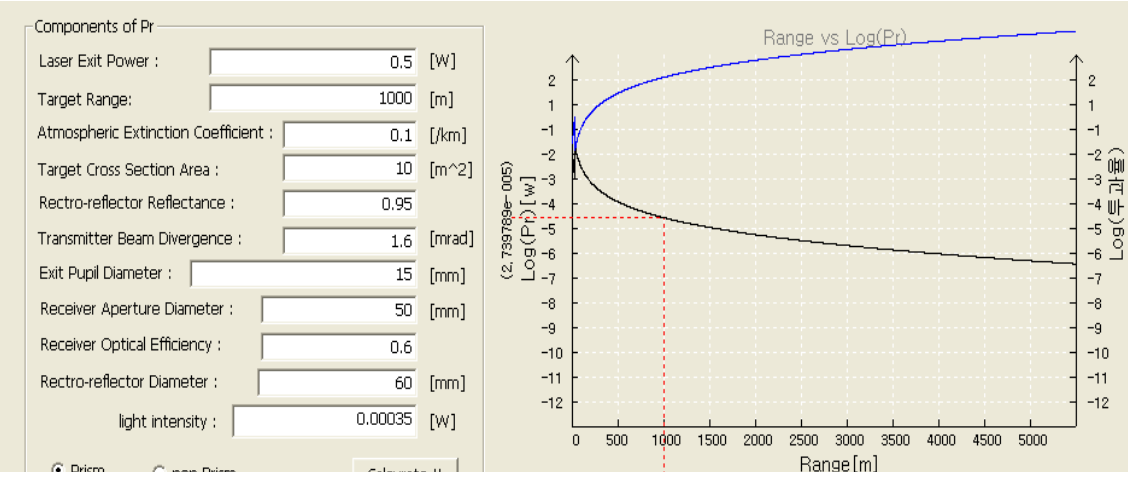


그림 4. LRF 방정식의 각 변수 값의 입력 및 수신 레이저 빔 파워, 투과율의 그래프
(좌 : 각 변수 입력 인터페이스, 우 : 수신 레이저 빔 파워 및 투과율)

3.2 ND필터 패턴의 간격 및 폭의 입력 및 투과율의 산출

ND필터의 격자무늬 패턴을 만들기 위해, 반지름 방향의 패턴과 원주방향의 패턴의 두 개의 패턴을 조합하고 있다. 단, LRF방정식에 따른 투과율의 변화는 ND필터의 회전각도에 따라 반지름 방향의 패턴의 폭에만 적용하였으며, 원주 방향 패턴의 폭은 회전각도 및 반지름의 거리에 관계없이 일정하다. 또한, 투과율의 산출에 있어서는 빛의 회절은 고려하지 않으며, 검색의 패턴에서는 빛이 전혀 투과하지 않는 것으로 가정하였다. 따라서, 패턴의 면적과 비패턴의 면적의 비율로 투과율을 산출하였다.

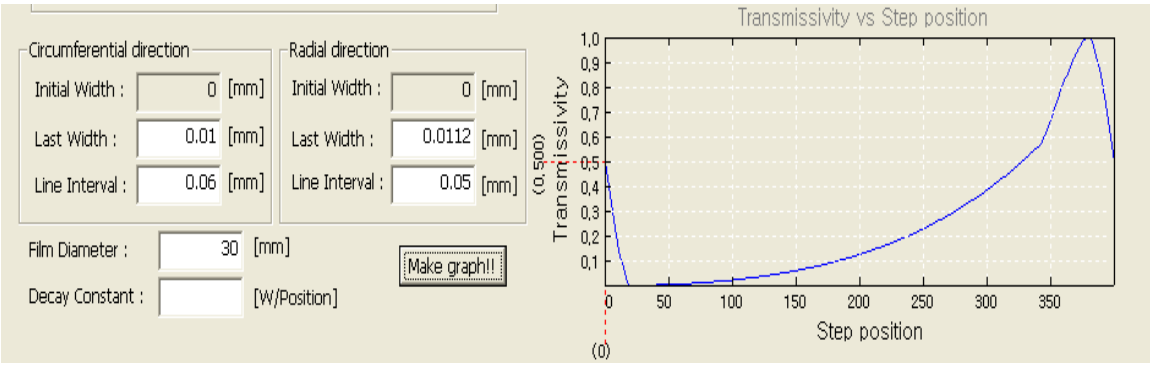
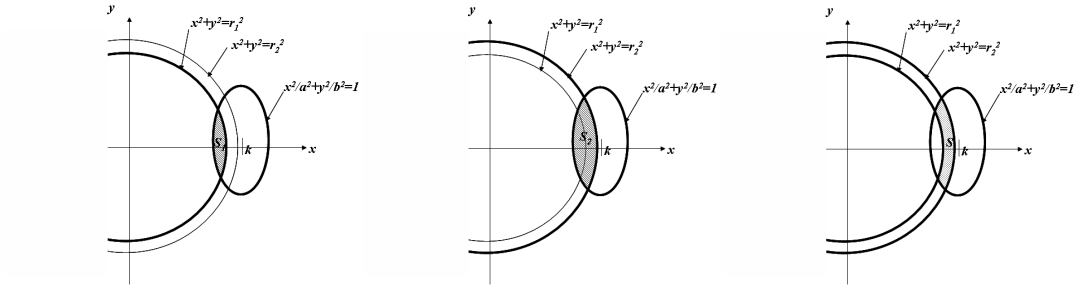


그림 5. ND 필름 간격 및 선폭의 입력창, 산출된 투과율의 그래프
(좌 : 각 변수 입력창, 우 : 회전 각도에 따른 산출된 투과율의 그래프)

다음에 각 패턴에 따른 투과율의 산출 과정을 나타낸다. 단, ND필터의 직경은 34.5[mm]이며, 반지름4[mm]~15[mm]범위에 패턴이 그려진다. 또한 ND필터에 맺히는 빔은 타원형으로 장축이 6.7[mm], 단축이 6[mm]이다. 단, ND필터의 중심에서 11.5[mm]의 거리 간격에 빔 타원의 중심을 가지며, 빔 타원의 단축 방향과 패턴의 원주가 직교하는 모양을 가진다.

3.2.1 원주 방향의 패턴과 투과율의 계산

그림 4.에 원주방향과 레이저 빔(이후, 타원으로 칭함)의 위치 관계를 도식화하여, 패턴 면적 산출을 나타냈다. 단, 도식을 간단히 하기 위해, 원주 방향의 패턴은 하나만 나타낸다. 단, ***r2>r1, k=11.5, a=3, b=3.35*** 이다.



(a) 패턴 안쪽 원과의 면적 S_1 (b) 패턴 바깥 쪽 원과의 면적 S_2 (c) 패턴 면적, S_2-S_1

그림 6. 패턴의 도식화 및 면적 산출

그림 4.에서 (a)의 면적S_1은 원 $x^2+y^2=r_1^2$와 타원의 겹치는 면적이고, (b)의 면적S_2은 원 $x^2+y^2=r_2^2$와 타원이 겹치는 면적이다. 따라서 S_1과 S_2 의 면적의 차이로 타원을 가리는 패턴의 면적을 산출 하고 있다.

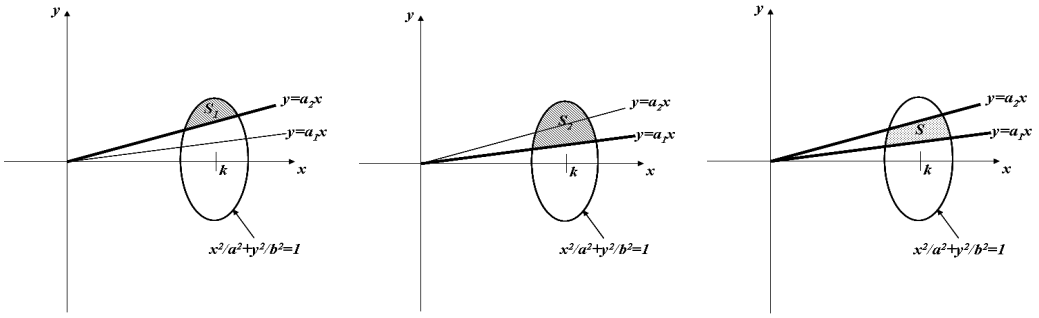
먼저, 면적S_1의 계산식을 아래에 나타낸다. 단, x_1은 타원과 패턴의 교점의 x좌표이다.

$$S_1 = 2\int_{x_1}^{r_1}\sqrt{r_1^2 - x^2}\,dx + 2\int_{8.5}^{x_1}\frac{b}{a}\sqrt{a^2-(x-k)^2}\,dx \ (\because x^2+y^2=r_1^2,\ x^2/a^2+y^2/b^2=1) \tag{2}$$

면적 S_2도 식 (3)과 동일한 방법으로 얻어진다. 따라서 타원을 가리는 패턴의 면적S는 S_2-S_1으로 구하여진다.

3.2.2 지름 방향의 패턴과 투과율의 계산

그림 5.에 지름 방향의 패턴의 도식화 및 면적 산출을 나타냈다. 단, ***a2>a1***이고, ***a, b, k***는 상동(上同)이다.



(a) 패턴 위쪽 직선과의 면적 S_1 (b) 패턴 밑쪽 직선과의 면적 S_2 (c) 패턴 면적, S_2-S_1

그림 7. 패턴의 도식화 및 면적 산출

그림 5.에서 면적 S_1는 지름 방향의 패턴 위쪽 직선과 타원의 겹치는 면적이고, 면적 S_2는 패턴 아래쪽 직선과 타원의 겹치는 면적이다. 따라서, S_2-S_1으로 지름 방향의 패턴과 타원의 겹치는 면적S을 산출 하고 있다.

면적S_1의 계산식은 다음과 같다. 단, x_1, x_2는 패턴의 직선과 타원의 교점으로 $x_1>x_2$이다.

또한, 면적S_2도 동일한 방법으로 산출되며, S_1과 S_2의 면적의 차이가 타원에 겹치는 지름 방향 패턴의 면적S가 된다.

$$S=\int_{x_1}^{x_2}\frac{b}{a}\sqrt{a^2-(x-k)^2}\,dx-\int_{x_1}^{x_2}a_2x\,dx\ (\because x^2/a^2+y^2/b^2=1,\ y=a_2x) \tag{3}$$

3.2.3 원주 방향과 지름 방향의 패턴의 겹치는 면적의 투과율 보상

이상의 방법으로 산출한 타원과 겹치는 지름 방향의 패턴의 면적S_r과 원주 방향 패턴의 면적S_c가 겹치는 부분면적S'를 산출 하여 패턴의 면적$S(=S_c+S_r)$에서 빼 줄 필요가 있다(그림 8).

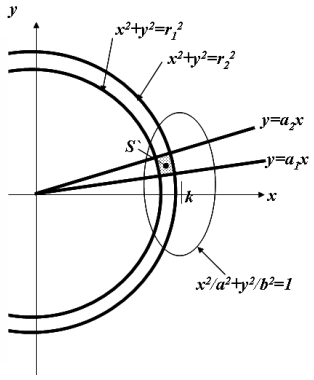


그림 8. 두 개의 패턴의 겹치는 면적

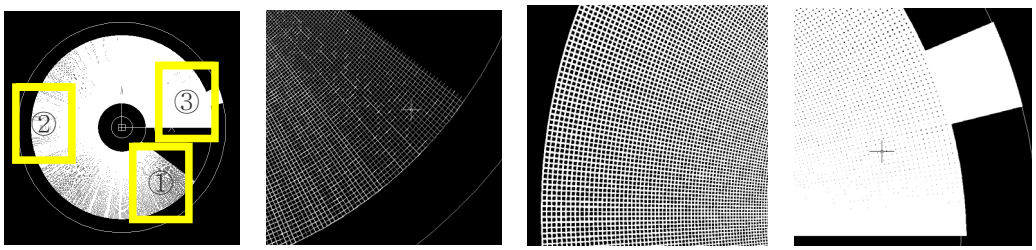
원주 방향의 패턴의 폭과 간격이 일정한 경우에는, 타원에 겹치는 원주 방향 패턴의 총 면적S_c과 지름 방향 패턴의 총 면적S_r이 겹치는 면적의 비율은 타원의 면적S_e에서 S_r이 겹치는 비율과 일치하기 때문에, 두 개의 패턴이 겹치는 면적은 간단하게 구할 수가 있다.

이상의 원주 방향과 반지름 방향 패턴의 면적 산출 과정을 ND필터의 회전 각도마다 산출하였으며, 산출된 면적으로 투과율을 계산하였다.

4. 실험 및 결과 고찰

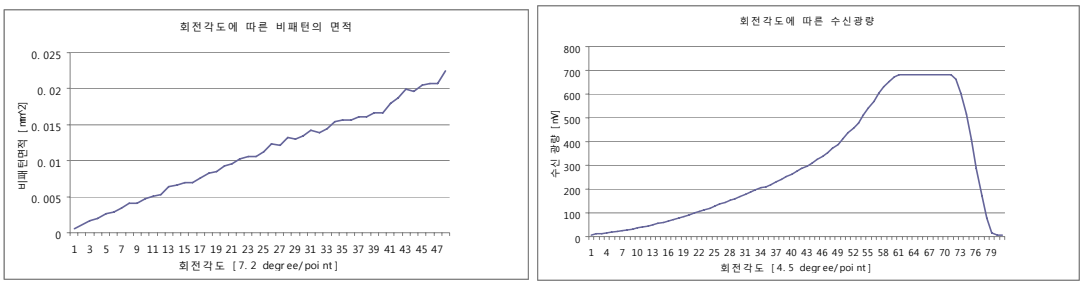
선형적 투과율 변화량을 가지는 ND필터를 시뮬레이션으로 설계하여, ND필름 시뮬레이션을 평가 실험 하였다. 이를 위해, 시뮬레이션으로 작성한 ND필터를, ObjectARX를 활용하여 AutoCAD 도면으로 작성하여 프린트하였다(그림 9.) .

그림 10.에 프린트한 ND필터의 패턴 폭 및 ND필터의 투과율의 변화의 측정값을 나타낸다. 단, ND필터의 폭은 최외각부분의 비패턴 면적을 공구 현미경(최소 눈금 : 10^{-3}[mm])으로 목시 측정한 것이며, 투과율의 변화는 광파워미터와 오실로스코프로 목시 측정한 결과이다. 단, 투과율 0인 부분을 회전각도 0으로 기준하였으며, 투과율이 높아질수록 회전각도가 높아진다.



(a) ND필터 전체 그림 (b) ①의 부분의 패턴 (c) ②의 부분의 패턴 (d) ③의 부분의 패턴

그림 9. 회전각도에 따른 패턴 폭의 변화 (AutoCAD 도면 공간)



(a) 회전각도에 따른 비패턴의 면적 (b) 회전각도에 따른 수신광량

그림 10. 회전각도에 따른 비패턴 면적 및 수신 광량의 변화

그림 10.에서, 비패턴의 면적측정에서 목시 오차가 인정되나, 회전 각도에 따라 선형적으로 변화하고 있다. 그러나, 실제 ND필름을 투과한 수신광량을 광파워미터로 측정한 결과에서는 선형적 변화가 인정되지 않았다. 비패턴의 면적이 클수록 수신광량이 지수함수적으로 증가하는 것으로부터, 격자무늬 패턴에서의 diffraction효과가 제일 원인으로 생각되어진다.

5. 결 론

3차원 레이저 스캐너에서는 유동적으로 변하는 거리 측정 모듈의 전자적 지연시간을 정밀하게 측정하기 위하여, 3차원 레이저 스캐너용 ND필터를 적용하였다. 이에 따라, ND필터의 효율적 설계를 위하여 시뮬레이션을 작성하였다. ND필터 시뮬레이션 공간에서 선형적 투과율 변화량을 가지는 ND필터를 작성하여, 실제 공간에서 실험을 한 결과, 비패턴 면적을 선형적으로 변화시켜도, ND필터의 투과율은 선형적 변화를 가지지 않는 것을 확인 하였다. 이

문제점은 격자무늬의 diffraction효과에 기인하는 것으로 생각되어지며, 위의 사항을 고려하여 다음의 과제가 부각된다.

가. 비패턴의 공간 면적에 따른 빛의 diffraction효과의 파악 및 시뮬레이션에 적용
나. 격자무늬 패턴뿐만 아니라 다양한 패턴의 시뮬레이션을 통한 ND필터의 설계

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시기술개발사업-지능형국토정보기술혁신사업과제의 연구비 지원(과제번호:07국토정보C02-2-2-03)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

이인수 (2007), 지상라이다를 이용한 건축물의 3차원 경계추출, 한국GIS학회지, 제15권, 제1호, pp.53~165.
추창우, 박지영, 김호원, 박정철, 임성재, 구본기(2007), 3차원 복원 기술 동향, 전자통신동향분석, 제22권, 제4호, 융합시대를 주도할 디지털콘테츠 기술특집.
赤外線技術研究會(1991), 赤外線工學 - 基礎と応用 -, オーム社, pp.181~183.