

홀로그래픽 광학소자 개발

Development of Holographic Optical Elements

정만호, 송재봉, 이인원

한국표준연구소 광학연구실

Abstract

Estimation and collection of the suitable recording materials are important for the fabrication of the holographic optical elements. In this study, silver halide emulsion, photoresist and dichromated gelatin are selected as a recording materials to investigate the properties and processing methods. Some parameters which affect the diffraction efficiencies of the holographic optical elements (HOE) are presented. As an example of the HOE, the results of design and the fabrication method of the off axis IZP hologram lens are also presented.

기능상으로는 일반적인 재래식 렌즈 및 광속분할기와 같은 굴절형 소자나 반사형 소자로서의 역할을 한다.

이러한 HOE는 많은 독특한 특징을 갖고 있는데 그중 몇가지를 소개하면 다음과 같다. (1) 한개의 HOE로써 다기능을 얻을 수 있다. 예를들면 렌즈, 광속분할기 그리고 간섭필터의 역할을 한다. (2) 동일한 기록 재료상에 여러개의 HOE를 함께 제작할 수 있어 집적화가 가능하다. (3) 재래식 광학소자는 일반적으로 표면 가공등의 과정을 통해서 얻어지므로 제작이 어려우나 HOE는 기록재료의 감광을 통해서 얻어지므로 제작이 간편하며 복제가 가능하여 대량 생산이 가능하다. (4) HOE는 박막 광학소자이므로 얇고 가볍다.

I. 서 론

홀로그래픽 광학소자(HOE)는 홀로그래피의 응용분야 중에서 최근에 많은 관심과 연구개발이 진행되고 있는 분야로써 확고한 위치를 차지하고 있다. HOE는 홀로그래프를 광학소자로 사용할때 일컫는 이름으로 홀로그래프에 기록된 파형을 재생시키거나 변형시켜서 원하는 파형을 얻고자 제작된 광학소자이다.[1]

일반적인 재래식 광학소자는 기능상으로 볼때 굴절형 소자, 반사형 소자 그리고 회절형 소자로 구분되는데, HOE는 대표적인 회절형 소자이다. 홀로그래픽 렌즈 또는 홀로그래픽 광속분할기 등은 회절형 소자이지만

일반적으로 HOE는 좁은 파장 대역폭 또는 색 수차가 비교적 커도 상관없는 시스템에 사용할 경우에는 대부분의 재래식 광학소자를 대체해서 사용될 수 있다. 따라서 아주 넓은 범위에 걸쳐 응용될 수는 없지만 재래식 광학소자가 할 수 없는 독특한 특징때문에 HOE의 응용분야는 더욱 확대될 것이다. 레이저 스캐너는 레이저 프린터의 핵심광학 부품으로 이전에는 다중 facet를 구성하기 위해 거울을 사용하였으나, 미국, 일본 등에서 홀로그래프를 개발하여 레이저 스캐너로 대체하고 있는 실정이다.[2] 간섭필터의 경우 재래식 필터는 진공증착 기술의 고도화를 요하며 이 때문에 제작이 어렵다. 홀로그래픽 간섭필터는 채적형 무과 및 반사 홀로그래프의 파장 선택성을 응용한 것으로 현재

레이저에 의한 시력보호를 위한 보호경과 광학시스템용 레이저 파장 간섭필터에 응용하려는 시도가 진행중이다. 이외에도 HOE의 응용은 많은 분야에 걸쳐 확대되고 있으며, 광전자 회로 및 신호처리, 광컴퓨팅 소자, 레이저 디스크 헤드 그리고 광속분할기 등에 걸쳐 응용되고 있다. 특히 HOE는 재래식 렌즈의 구면 검사 및 파면수차 보정에 많이 응용되고 있는데, 컴퓨터 홀로그램(CGH)을 사용하면 임의의 위상을 갖는 HOE의 제작이 가능하다.[3] 따라서 HOE에 CGH를 결합하면 더욱더 효과적인 HOE의 기능을 할 수 있게 된다. 실제적으로 HOE를 응용하기 위해서는 몇가지 중요한 기술적인 문제가 있는데 이들은 설계 및 해석기술, 감광재료 기술 그리고 제작 및 평가기술 등으로 크게 분류될 수 있다. 이들은 HOE의 중요한 성능요인인 높은 회절효율, 낮은 산란광량, 파장 및 각도 특성 등에 직접적인 영향을 끼치므로 대단히 중요하다.

본 논문에서는 HOE의 기본특성, 감광재료의 특성을 소개하고 실제적인 HOE의 제작으로 홀로그래픽 렌즈 제작 결과를 제시하기로 한다. 특히 감광재료의 종류 및 처리방법, 특성분석 및 응용한계를 밝히고 최대회절 효율을 습득하기 위한 제작조건 및 주요 인자를 소개하기로 한다.

II. HOE의 기본 특성

Fig. 1은 간단한 HOE의 형성 및 재생을 나타내고 있다. Fig. 1(a)는 한개의 평면파(기준파)와 한개의 구면파(물체파)가 간섭을 일으켜 감광재료에 형성되는 과정을 나타내고 있으며, Fig. 1(b)는 HOE에 평면파를 입사시켰을 때 구면파가 재생되는 모습을 나타내고 있다. Fig. 1(c)는 구면파를 HOE에 입사시켰을 때 평면파가 재생되는 모습을 나타내며, Fig. 1(d)와 Fig. 1(e)는 각각 conjugate파를 입사시켰을 때 촛점으로 결상되는 파와 평면파가 재생되는 모습을 나타내고 있다.

Fig. 1 에서 알 수 있듯이 HOE는 기록된 파형을

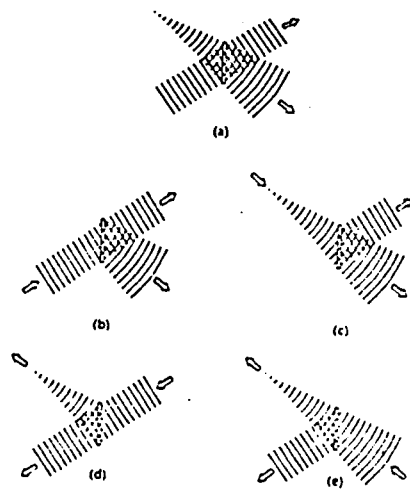


Fig. 1. Wavefront construction and reconstruction from a simple HOE.

재생시키는 소자이다. 따라서 Fig. 1(b)는 확대되고 있는 구면파를 얻을 수 있으며, Fig. 1(d)는 렌즈의 역할을 하고 있다. 이 때문에 HOE는 한개의 소자로 여러가지의 기능을 할 수 있는 독특한 특징을 갖게 된다.

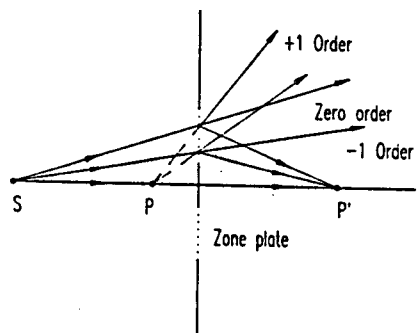


Fig. 2. Focusing properties of a HOE.

일반적으로 Fig. 2와 같이 두개의 점광원으로 형성된 간단한 홀로그램을 제작하면 zone plate를 얻게 되는데 이때 촛점거리 f 는 식(1)과 같이 표현된다.[4]

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{R_o} - \frac{1}{R_r} \quad (1)$$

이때 R_o 는 홀로그래프 중심으로 부터 점광원 P 까지의 거리, R_r 은 S 까지의 거리를 나타낸다. 식(1)은 일반적인 얇은 렌즈의 촛점거리식과 같은 형태를 나타낸다.

III. 감광재료의 특성분석

최근에 홀로그래픽 광학소자 제작에 필요한 감광 재료에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 성능이 우수한 HOE를 제작하기 위하여 감광재료를 선택할 때 특히 고려해야 할 사항들은 회절효율, 각도 및 파장감도 그리고 환경적인 안정성 등이다. 회절효율 특성은 매우 중요한 사항으로 위상형 홀로그래프인 경우에 이론적으로 100%의 회절효율값을 얻을 수 있으며 은염사진건판, 포토레지스트, 그리고 dichromated gelatin (DCG) 등이 감광재료로 가장 많이 사용되고 있다.

1. Silver halide emulsion 감광재료

은염사진건판은 홀로그래프 형성에 있어 가장 많이 사용되고 있는 재료로써 광선에 대해 민감한 광화학 반응을 일으키는 할로젠화은의 미세한 결정 입자를 젤라틴에 섞어 유리 혹은 필름에 발라놓은 것으로 레이저에 의해 노출이 되면 할로젠화은은 눈에 보이지 않는 잠상을 형성하게 된다.

잠상을 현상액으로 처리하여 눈에 보이는 화상으로 만드는 것을 현상이라 하며 현상이 끝난 후 정착을 하면 진폭변조형 HOE를 얻게 된다. 이러한 진폭변조형 HOE는 회절효율이 대단히 낮아 실용적인 광학소자로 사용하기가 어렵다. 최근에는 풀로이드 형태의 은입자 형성을 통해 진폭변조형 및 위상변조형 동시에 일으키는 방법과 이때의 회절효율을 분석한 논문들이 나왔다.[5] 이 방법은 현상시 필라멘트의 성장 및 그로인한 흑색의 은입자 형성을 보합제를 섞어 형태를 변화시켜 필라멘트

구조로 형성된 것을 구형의 입자들로 바꾸게 된다. 이때 생긴 은입자의 직경은 0.01 μm 부터 0.05 μm 범위에 이르게 되는데 이를 풀로이드 형태라 하며 적갈색을 띄게 된다. 풀로이드 형태의 현상 방법은 결국 현상과정만으로 적갈색의 은입자가 형성되어 광학 밀도가 낮아 회절효율을 50% 까지 얻을 수 있다. 이렇게 얻어진 HOE는 빛이 흡수되어 100%의 회절효율은 얻을 수 없으나 산탄광량은 대단히 적은 장점이 있다.

진폭 변조형을 굴절을 변조된 위상형으로 전환시키는 방법에는 여러가지가 있다. 초기에는 현상으로 형성된 은입자를 용해시키는 방법을 표백작용이라 하였으나, 요즘에는 여러가지의 표백 방법이 개발되었다. 현재 가장 많이 사용되는 방법은 현상 및 정착후에 은염 재생성에 의한 표백방법으로 이러한 변조방법을 사용하면 회절효율을 90% 까지 향상시킬 수 있다.

은염재생성 방법의 가장 큰 문제점은 정착액에 의해서 노출되지 않은 부분에 남아있던 은염이 제거될때 젤라틴의 층이 다소 손상을 입게 되며 두께가 감소되는 점이다.[6] 이러한 결과는 반사형 홀로그래프 제작시에 Lippman 층에 역효과를 일으키게 되어 문제가 되며 또한 투과형 홀로그래프의 경우 간섭무늬의 이동을 초래하게 되어 효과적인 파형 재생을 어렵게 만든다. 결과적으로 은염재생성 방법은 쉽게 수행할 수 있으며 높은 회절효율을 얻을 수 있다는 장점이 있으나 산탄광량이 많다는 단점이 있다. Fig. 3은 은염재생성 과정으로 형성된 투과형 회절격자(1200 lines/mm)의 회절효율값을 나타내고 있다.

최근에는 현상후 곧바로 은염재생성 표백을 하는 방법이 소개되었는데, 표백 과정에서 은이온의 확산 이동에 의해 굴절을 변조가 발생한다.[7] 이 방법의 큰 장점은 정착 과정을 생략하므로 은염의 제거로 인한 에멀전의 수축 및 봉긋현상을 줄일 수 있으며 따라서 간섭무늬에 영향을 적게 끼치며 산탄광량을 줄일 수 있다는 것이나 회절효율이 다소 낮은 (< 60%) 것이 단점이다.

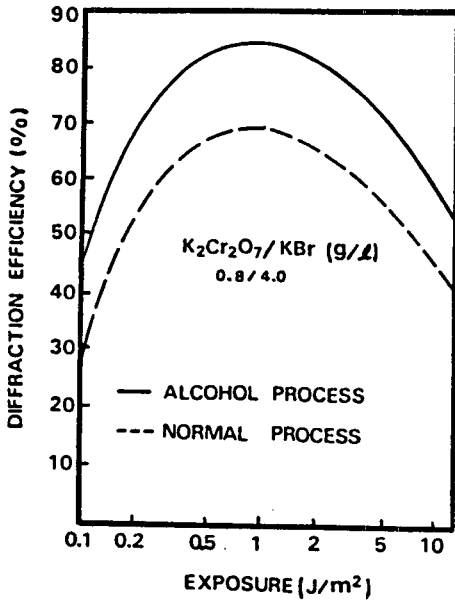


Fig. 3. Diffraction efficiency of the grating formed by the rehalogenating bleaches.

2: Photoresist 감광재료

포토레지스트는 노출과 현상과정을 거쳐 표면양각 (surface-relief) 형태를 갖게 되는 빛에 민감한 유기 물질이다. 포토레지스트에는 음성물질과 양성물질의 두 종류가 있다. 음성의 포토레지스트는 빛에 노출되면 현상시에 노출된 부분은 녹지 않고 노출되지 않은 부분은 녹아 없어지게 된다. 양성의 포토레지스트의 경우에는 이와 반대로 빛에 노출된 부분이 씻겨 없어지게 된다.

포토레지스트 표면양각된 회절격자는 홀로그래피 간섭무늬에 의해 노출된 후 현상 처리하여 형성할 수 있다. 현상액에서의 포토레지스트의 용해 정도는 노출량에 좌우된다. 따라서 광세기의 변화에 따른 간섭무늬의 형태는 격자의 깊이의 변화로 전환되는 것이다. 표면양각된 위상형 회절격자의 회절현상에 관한 이론식에서 알 수 있듯이 회절효율은 격자의 깊이와 격자 간격의 비의 함수가 된다. 이때 격자의

깊이의 조절이 가장 큰 요소가 되며, 이는 노출과 현상의 정도에 의해 결정되므로 이들을 잘 조절하는 것이 대단히 중요하다.

노출량 E에 따른 격자의 깊이의 변화 Δd 는 [8]

$$\Delta d = \Delta r c T E \quad (2)$$

가 되며 이때 Δr 은 포토레지스트의 식각율, c는 포토레지스트의 노출상수, T는 현상시간을 나타낸다.

이때 포토레지스트의 노출상수인 $c = \eta_q \alpha / hf$ 이며, AZ-1350 포토레지스트의 경우 $\eta_q = 3.2\%$, $\alpha = 6.25 \times 10^{-17} \text{ cm}^2 \cdot \text{eV}^{-1}$ 임이 알려져 있으므로, $c = 0.5 \times 10^{-2} \text{ cm}^2 \cdot \text{mJ}^{-1}$ 이 된다.

본 연구에서는 현상액 D450으로 현상하였을 때 현상 시간 T에 따른 격자깊이를 실험적으로 구한 후에 식(2)을 사용하여 AZ-1350 포토레지스트의 식각율 Δr 을 구하였다.[4]

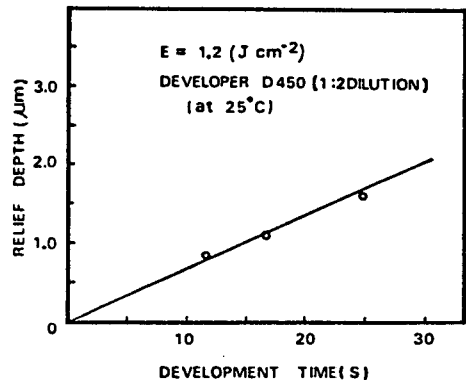


Fig. 4. Relief height change Δd as a function of the development time T.

Fig. 4에 노출 및 현상시간 T에 따른 격자깊이의 변화 Δd 를 측정된 값을 나타내었다. 포토레지스트 AZ-1350J에 입사되는 에너지는 1.2 J/cm^2 였으며 현상액은 D450과 증류수를 1:2로 희석시킨 것을 사용하였다. 현상시간 T가 25 sec일때 약 $1.7 \mu\text{m}$ 정도 격자가 식각

되었다. 이제 식(2)와 Fig. 4에서 식각을 Δr 을 구하면 $\Delta r = 0.01 \mu\text{m}/\text{sec}$ 이 된다.

3. Dichromated Gelatin 감광재료

일반적으로 DCG는 $(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 감광제로 sensitization된 젤라틴을 사용하는데 이때 빛에 노출되면 Cr^{6+} 은 광작용에 의해 직접 또는 간접적으로 Cr^{3+} 로 환원되어 중간 단계의 크롬 화합물들을 생성한다. Cr^{3+} 은 인접한 젤라틴 분자와 작용하여 cross-link를 형성하는데 이 때문에 젤라틴이 경화되어 빛에 노출된 부분과 빛에 노출되지 않은 부분간에 경화 정도의 차이가 생겨 홀로그래프의 잠상(latent image)을 형성한다. 이제 현상을 하면 젤라틴내에 남아있던 화합물들이 제거되며 젤라틴 필름은 빛에 노출된 부분과 빛에 노출되지 않은 부분과의 경화도도가 뚜렷해지며, 이 때문에 굴절을 변조가 생기게 된다.

Cr^{6+} 는 어두운 곳에서도 Cr^{3+} 로 환원되기도 하는데 이때 노란색에서 적갈색으로 변화한다. 이러한 반응은 빛에 노출되지 않고도 어둠속에서도 생기므로 암반응이라 한다. 이러한 암반응은 젤라틴을 급격히 경화시켜서 환경조건에 맞을 때에는 젤라틴의 굴절을 변조의 능력을 감소시키게 된다. 이러한 암작용 때문에 가끔 실험적인 결과의 반복성이 좋지 않게 된다.

DCG를 이용한 홀로그래프의 형성 과정은 크게 젤라틴 박막의 준비, 감광제 첨가, 노출 및 현상 과정으로 분류할 수 있다. 젤라틴 박막을 준비하는 전처리 과정의 주된 목적은 젤라틴 필름의 경화정도를 적당하게 만드는 것이므로 잘 조절하여야 한다. 젤라틴의 경화정도는 현상시에 다시 조절할 수 있으므로 초기 경화정도는 임계 경화정도보다 약간 높게 만드는 것이 좋으며, 경화정도가 작게 되면 현상시에 물에 녹아 산탄 광탕을 크게 일으키게 된다.

현상과정은 두 부분으로 구별할 수 있다. 물에 의한 현상과 알콜에 의한 현상인데, 첫단계의 수세 현상 과정은 젤라틴의 부풀림에 의한 굴절을 변조를 일으키며

두번째 단계의 알콜 현상 과정은 수세현상에 의한 굴절을 변조를 더욱 증폭시킨다.

수세 현상 과정에서의 첫단계 변조를 Δn_w 라 하면 Δn_w 는 빛에 노출된 부분의 젤라틴과 빛에 노출되지 않은 젤라틴의 경화 차이인 Δh 에 의해 결정되므로 [1]

$$\Delta n_w = k_i \Delta h \quad (3)$$

이 되며, 이때 k_i 는 젤라틴의 부풀림 특성에 의해 결정되는 이득 값이다.

수세 현상에 의한 첫단계 굴절을 변조는 다음 단계의 알콜현상에 의한 굴절을 변조로 더욱 증폭되며 이때 최종적인 굴절을 변조 Δn 은 식 (4)와 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta n = k_f \Delta n_w = k_f k_i \Delta h \quad (4)$$

이때 k_f 는 일정한 이득값이다.

실험 과정으로는 우선 Kodak 649F 사진건판을 경화제의 농도가 3.25% 섞인 정착액속에 담가 은염을 제거한 후에 흐르는 물에 10분간 세척한다. 이때 젤라틴의 초기 경화정도가 결정되며 젤라틴은 부풀어 오르고 부풀림값을 구할 수 있다. 감광제 첨가는 젤라틴 필름의 농도가 10%인 $(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 에 담금으로써 이루어진다. 5분후 감광제가 첨가된 젤라틴 필름을 꺼내어 80 °C의 온도에서 10분간 말린다. DCG 필름이 완전히 마른 후 아르곤 레이저 ($\lambda = 488 \text{ nm}$)로 간섭 무늬를 노출시키고 0.5%의 $(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 에 담근다. 다시 DCG 필름을 꺼내어 경화제가 첨가된 정착액 속에 담근다. 현상을 위해 DCG 필름을 물속에 10분간 담가 놓게 되는데 이때 경화정도를 조절할 수 있다. 필름을 꺼내어 isopropanol을 사용해서 수분용 완전히 건조시킨 후 80 °C 에서 10분간 건조시킨다.[10]

Fig. 5는 처리방법에 따라 제작된 투과형 회절격자의 노출량 및 회절효율 특성을 측정한 값이다. 이때 처리 방법 1, 2, 3은 전처리 과정에서 젤라틴 필름의 부풀림

정도를 각각 다르게 얻도록 전처리 과정을 변화시킨 것이다.

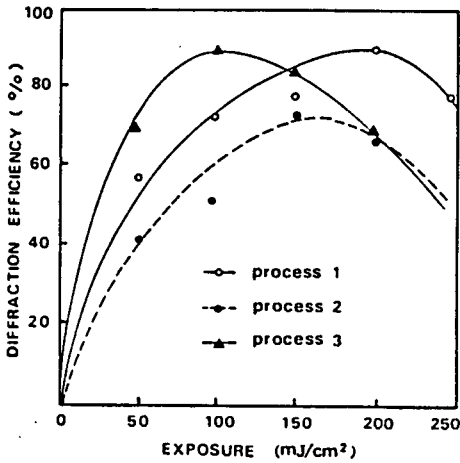


Fig. 5. Characteristics of diffraction efficiency for various processing methods.

IV. IZP 홀로그래픽 렌즈의 제작

IZP(Interferometric Zone Plate)는 한개의 평면파와 한개의 구면파의 간섭으로 형성되며, 레이저 광의 스캐닝 및 집속 능력에 대한 공간주파수 분포 특성이 뛰어나다.

Off-axis IZP 홀로그래프는 Fig. 6에 나타나 있는 바와 같이 형성된다. 이때 형성된 홀로그래프의 x점에서 공간 주파수는 식 (5)와 같이 주어진다.[11]

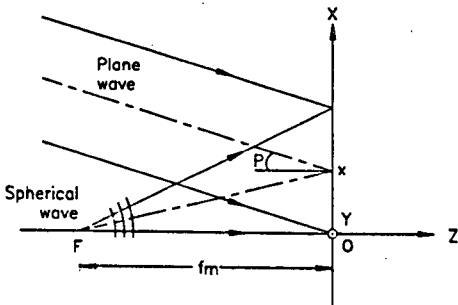


Fig. 6. Off-axis IZP recording geometry.

$$f(x) = \frac{1}{\lambda} [\sin(-p) + \sin(\tan^{-1} \frac{x}{f_m})] \quad (5)$$

이제 Fig. 7과 같이 홀로그래프를 재생시키면 영상거리 b(x)는

$$b(x) = \frac{2\Delta x}{\tan \alpha(x + \Delta x) - \tan \alpha(x - \Delta x)} \quad (6)$$

가 되며, 이때

$$\alpha(x \pm \Delta x) = \sin^{-1} \left\{ \sin(-p) + \sin \left[\tan^{-1} \left(\frac{x \pm \Delta x}{f_m} \right) \right] \right. \\ \left. - \sin \left[\tan^{-1} \frac{\pm (M-1)x}{M \cdot f_m} \right] \right\} \quad (7)$$

따라서 중심 회절각 $\alpha_0(x)$ 는 식 (8)과 같이 주어진다.

$$\alpha_0(x) = \sin^{-1} \left\{ \sin(-p) + \sin \left[\tan^{-1} \left(\frac{x}{f_m} \right) \right] \right\} \quad (8)$$

결국 상대적으로 영상거리의 오차는 적당한 입사각 P를 선택하면 원하는 회절각 $\alpha_0(x)$ 근처에서 최소화 시킬 수 있다.

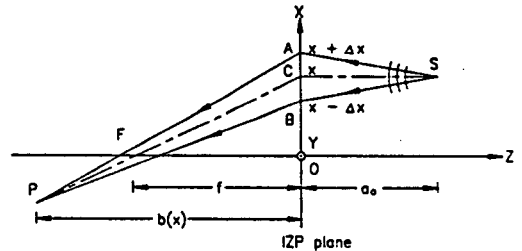


Fig. 7. IZP reconstruction geometry.

Fig. 8은 배율 M = 4.0 일때 입사각 P를 변화시킴에 따라 회절각 $\alpha_0(x)$ 에서 오차가 최소화 될 수 있는 값들을 구한 값이며, Fig. 9는 배율 M과 회절각 $\alpha_0(x)$ 를 변화시켰을 때 오차를 최소화 시킬 수 있는 입사각 P를 구한 그림이다.

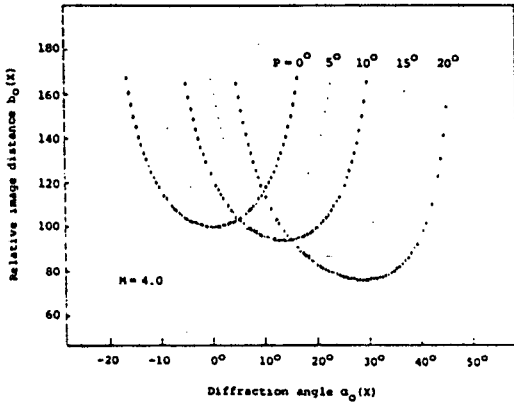


Fig. 8. Image distance errors in an off-axis IZP hologram lens (Magnification $M = 4.0$)

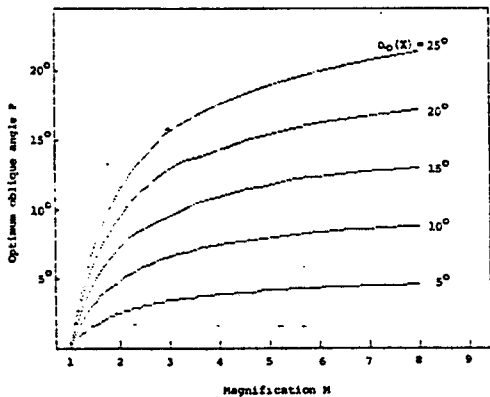


Fig. 9. Optimum incident angle P of the off-axis IZP hologram lens.

V. 결 론

홀로그래피 광학소자는 제품이 가볍고 제작이 간편하며 한개의 홀로그래피 광학소자로 여러기능을 갖는 소자로 사용할 수 있는 특징뿐 아니라 본 제품을 대량으로 생산할 수 있다는 장점이 있다.

홀로그래피 광학소자의 제작에 있어 가장 중요한 사항은 감광재료의 평가 및 선정이라 할 수 있다. HOE의 종류 및 용도에 맞는 각각의 특성이 있기 때문에 적절한 감광재료의 선택은 무엇보다 중요하다. 본

연구에서는 은염사진건판, DCG, 그리고 포토레지스트의 특징 및 처리 방법 그리고 제작상 주의해야 할 사항들을 연구하였다. IZP 렌즈를 설계하여 제작하였는데, 렌즈의 수차를 제거하기 위해 off-axis IZP 방법을 사용하였다. 앞으로 본 연구를 통하여 개발된 HOE의 응용분야 확대에 대한 연구가 깊이 수행될 것이다.

참고문헌

- [1] B.J. Chang and C.D. Leonard, *Appl. Opt.*, **18**, 2407 (1979).
- [2] C.J. Kramer, *SPIE Proc.*, Vol. **390** (1983).
- [3] J.N. Latta and R.C. Farchild, *SPIE*, **107** (1973).
- [4] R.J. Collier, C.B. Burckhardt, and L.H. Lin, *Optical Holography*, New York, Academic Press (1971).
- [5] R.L. Van Renesse and F.A.J. Bouts, *Optik*, **38**, 156 (1973).
- [6] P. Hariharan and C.M. Chidley, *Appl. Opt.*, **26**, 3895 (1987).
- [7] P. Hariharan and C.M. Chidley, *Appl. Opt.*, **27**, 3852 (1988).
- [8] R.A. Bartolini, *Appl. Opt.*, **13**, 129 (1974).
- [9] M.H. Jeong and I.W. Lee, *KIEE International Conference '88*, Seoul, **261** (1988).
- [10] M.H. Jeong, J.B. Song and I.W. Lee, "A Study on Processing Methods of Dichromated Gelatin Holographic Recording Materials", Submitted to *New Physics*.
- [11] Hiroyuki Ikeda, Moritoshi Ando, and Takefumi Inagaki, *Appl. Opt.*, **18**, 2166 (1979).