

## As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 박막을 이용한 광 fSDF 필터 제작

### Fabrication of Optical fSDF Filter Using As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> Thin Film

정재우 김홍만 심창섭\*

한국전자통신연구원 광전자연구실 광통신연구실\*

#### <ABSTRACT>

The As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> thin film has a characteristics of optical modulation in both amplitude and phase. Since the As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> thin film can be used as a real-time reconfigurable optical filter, the fSDF filter can be optically fabricated on it. According to the modulation characteristics of the As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, the optimal fSDF filter recorded on this thin plate has the form of continuous amplitude and binary phase. Computer simulation and optical experiments on the optical pattern classification show that the As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> is suitable for the optical fSDF filter.

#### 1. 서론

광학적 유형인식에서 광학필터는 유형의 정보를 저장하고 있는 핵심소자이다. 광학필터로 개발된 SDF MSF (synthetic discriminant function matched spatial filter)는 광학적 유형 인식에서 필터 내에 여러 유형에 관한 정보를 동시에 저장하고 있는 다중정합공간필터(multiple matched spatial filter)의 일종이다.<sup>(1)</sup> SDF MSF는 입력 유형이 변형된 경우(회전, 크기변화 등)에도 인식이 가능하다는 특성 그리고 입력유형들을 그 특징에 따라 분류할 수 있는 분류기능을 갖고 있다.

SDF MSF 광학필터는 SDF를 푸리에 변환한 주파수 스펙트럼을 이차원 평면상에 나타 낸 것이다. 그런데 이 때 주파수 스펙트럼 분포값들은 진폭 및 위상 성분을 동시에 갖는 복소값이다. 따라서 실제 광상관기를 구성하여 유형인식 실험을 하는 경우에는 복소값을 이차원 평면 상에 CGH 기술을 통해 공간코딩 방법으로 표현한다.

Horner는 복소필터를 근사화하여 위상값만을 갖는 POF(phase only filter),<sup>(2)</sup> 그리고 위상값을 이진값만으로 표현한 BPOF(binary POF)<sup>(3)</sup>를 소개하였다. POF는 총래 복소필터에 비해 빛루과효율이 높고(이론상 100%), 상관처리결과 얻어지는 상관피크치가 가늘기 때문에 인식효율이 증대된다. 그리고 BPOF인 경우에는 두 가지 값만으로 필터를 표현할 수 있기 때문에 제작처리가 간단하다.

그런데 SDF와 같이 여러 유형에 관한 정보가 중첩되어 저장되어 있는 필터값을 POF 또는 BPOF와 같이 필터 변조하는 경우에는 각 유형 정보의 손실되는 정도가 제각기 다르기 때문에 테스트 유형들과 이 필터와의 상관처리 결과 얻은 상관피크값들은 제각기 서로 다른 크기를 갖게 된다. SDF 필터를 이용한 유형인식은 상관피크값들의 세기를 비교하여 유형을 판별하는 과정이므로 이 같은 상관피크값 왜곡 현상은 SDF를 이용하는 인식 결과에 치명적인 문제를 야기시킨다.<sup>(4)</sup>

D.A.Jared는 SDF 복소필터를 POF 또는 BPOF로 필터 변조하더라도 상관결과가 전혀 영향을 받지 않는 새로운 개념의 필터 변조 SDF 설계 알고리즘을 소개하

였다.<sup>(5)</sup> fSDF(filter SDF)라고 이름지어진 이 필터는 필터변조에 의한 근사화 과정에서도 초기 SDF 복소필터에 의한 상관결과가 계속 유지될 수 있도록 반복계산을 통해 최적 필터값을 구한 것이다.

본 논문에서는 fSDF 광학필터를 순수 광학적으로 제작하는 방법을 소개한다. fSDF 필터를 광학적인 방법으로 기록하기 위해서는 실시간적으로 연속 광변조가 가능한 SLM을 필요로 한다. 본 논문에서는 진폭 및 위상 변조가 가능한 As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 박막을 실시간 SLM으로 사용하였다. As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 박막은 입사법에 의해 광유도 비동방성 현상이 나타 나는데, 이 현상과 빛의 편광특성을 이용하여 진폭 및 위상변조 결과를 얻을 수 있다.<sup>(6)</sup> 그리고 As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 박막에 최종적으로 기록되는 fSDF 필터는 박막에서의 광변조 특성에 의하여 진폭값은 연속적으로 변하면서 위상값은 이진 상태를 유지하는 CABPF(continuous amplitude binary phase filter)로 표현된다.

광학적 상관 과정 및 광학적 필터 제작 과정에서는 유형의 실시간 입력을 위해 저가의 SLM으로 각광받고 있는 LCTV SLM을 사용하였고, PC로써 광학실험의 전 과정이 제어되도록 하였다.

#### 2. 필터 변조 SDF(filter modulation SDF)

##### (1) SDF 알고리즘

입력 유형들을 임의의 그룹으로 분류하기 위한 SDF는 다음과 같이 계산된다. n개의 테스트 유형들을 f<sub>i</sub>(x,y)(i=0,1,...,n)이라고 하고, 이 유형들을 분류할 수 있도록 설계된 SDF를 h(x,y)라고 하면 이 h(x,y)는 다음과 같이 대상유형들의 선형 결합식으로 쓸 수 있다.

$$h(x,y) = \sum a_i f_i(x,y) \quad (1)$$

이 때 SDF h(x,y)의 유형 분류 규칙은 가중값 a가 어떤 값을 취하느냐에 따라 결정된다. 따라서 입력유형들을 특정한 규칙에 따라 분류할 수 있는 SDF를 계산한다는 것은 바로 특정 a 값들을 계산하는 과정이라고 할 수 있는데, 그 과정은 다음과 같다. SDF를 이용한 유형 분류 과정에서는 입력 유형과 SDF와의 상관처리 결과로 얻어지는 상관피크치의 세기에 의해서 특정 그룹으로 분류된다. 이 상관 처리과정을 식으로 표현하면

$$f_i(x,y) * h(x,y) = c_i \quad (2)$$

이 된다. 여기서 \*는 상관을 의미한다. 식 (2)에서 c<sub>i</sub>는 1 또는 0의 값을 갖는데 SDF h(x,y)의 분류 규칙은 이들 값에 의해서 정해진다. 이제 식 (1)을 식 (2)에 대입한 다음, 이로부터 가중값들 a를 얻을 수 있다. 이 값을 식(1)에 대입하여 목적하는 SDF h(x,y)를 계산할 수 있다.

(2) 필터 변조 SDF

이제 이 SDF로부터 광학필터를 제작하여 광유형분류 실험을 하기 위해서는 SDF를 이차원 푸리에변환(Fourier transform) 한 주파수 스펙트럼 분포값들을 이차원 평면 상에 나타낼 수 있어야 한다. 이때 스펙트럼 분포값들은 복소값들이기 때문에 이 값들을 이차원 공간 평면상에 나타내기 위해선 CGH 기술이나, 혹은 POF, BPOF 등 필터 변조과정을 필요로 한다. 본 논문에서는 필터값을 나타 내기 위하여 이진 변조 SLM을 사용하는 것을 전제로 하였기 때문에 SLM에 표현하기 적합한 BPOF 필터 변조 알고리즘을 이용한 SDF만을 실험 대상으로 하였다. 복소 필터값을 BPOF로 근사화하기 위한 변조규칙은 다음과 같다.

$$BPOF[H(u,v)] = \begin{cases} 1, & \text{Re}[H(u,v)] > 0 \\ -1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

D.A.Jared 은 SDF 필터의 이진화과정에서 각 유형에 관한 정보가 손실되는 양을 균일하게 함으로써 각 유형에 의한 상관피크치 세기들의 비를 일정하게 유지할 수 있는 필터 변조 SDF(fSDF) 설계 알고리즘을 제안하였다.

fSDF 설계를 위한 최적 가중치  $a$ 를 얻기 위한 과정은 다음과 같다. fSDF  $h'(x,y)$ 는 테스트 유형들 대신에 주파수 영역에서 미리 필터 변조된 유형들을 선형결합한 식이다.

$$h'(x,y) = \sum a_i F^{-1}\{\text{MOD}\{F\{f_i(x,y)\}\}\} \quad (4)$$

여기서 MOD는 주파수 영역에서의 필터 변조 과정을 의미하고,  $F$ 는 푸리에 변환을 의미한다. 이제 식 (4)의  $h'(x,y)$ 를 식 (2)의  $h(x,y)$ 에 대입하여 fSDF 설계를 위한 최적  $a$ 를 계산한다. 이 때의 식은  $a$ 에 대해 비선형 함수이므로  $a$ 값들을 직접 구할 수는 없다. 따라서 D.R.Jared는 반복 계산법을 통하여 식 (2)의 상관 조건을 만족시킬 수 있는  $a$ 의 최적 근사값을 구하였는데 그 과정은 다음과 같다. 우선 반복계산을 도입할  $a$ 의 초기값으로 이 fSDF가 목표하는 상관값  $c$ 를 대입한다. 이후 최적 근사값  $a$ 를 반복계산 과정을 통해 얻는데, 이 과정에서 매 반복계산 시 가중값들의 변화량  $\Delta a$ 는 다음으로 부터 계산된다.

$$\Delta a_i = \beta [c_i - c_o(m_o/m_i)] \quad (5)$$

여기서  $\beta$ 는 수렴율을,  $c_o$ 는 각 테스트 유형  $f_i(x,y)$ 에 대한 원하는 상관피크값을, 그리고  $m_i$ 는 입력유형  $f_i(x,y)$ 와, 바로 전 단계의 가중값  $a_i$ 를 사용하여 계산된 fSDF와의 상관계산 결과로 얻어진 상관피크값을 의미한다.

본 논문에는 fSDF 필터를 광학적인 방법을 사용하여 제작하였다. 이 과정에서는 각 유형들을 푸리에변환하여 얻은 BPOF[F] 이차원 패턴들을 주파수 평면에 놓인 광학 필터에 광학적인 방법으로 직접 기록하면서 최적 fSDF를 제작해 나간다. fSDF 광학 필터의 설계과정을 주파수 영역에서 해석하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$H_{\text{opt}}(u,v) = \sum a_i BPOF[F_i(u,v)] \quad (6)$$

여기서  $H(u,v)$ ,  $F(u,v)$ 는 각각  $h(x,y)$ ,  $f(x,y)$ 를 푸리에 변환한 스펙트럼 분포값이다. 즉 BPOF[F]<sub>i</sub>의 이차원 패턴들을 광학필터 소자에 직접 조사하면서 최적 fSDF 필터를 기록해 나간다. 이때 각 BPOF[F]<sub>i</sub>들을 조사하는 시간  $t_i$ 은 매 반복 계산과정에서 얻어지는  $\Delta a_i$  값들에 비례하는데  $a_i$ 는 식 (5)에서와 같은 방법으로 구할 수 있다. 광학 필터 소자에 fSDF 필터를 기록하는 과정은 필터로 사용되는 광학소자의 광변조 특성에 크게 좌우된다. 다음 장에서 본 논문에서 사용한 광학소자의 광변조 특성에 잘 어울리는 fSDF 광학 필터의 제작과정에 대해 자세히 설명한다.

3. 광학적 fSDF 필터

비정질  $As_2S_3$  박막에 선평광원 Ar 레이저빔(0.515 um)을 펄스빔으로 조사하면 박막 내에 광유도 비등방성 현상이 나타 난다. 즉 박막내에서 입사빔의 편광 방향에 나란한 방향과 수직된 방향에서의 빛에 대한 굴절율이 서로 다르게 되고, 흡수율에 있어서도 또한 같은 현상이 나타난다. 이 박막에 선평광원 탐사빔(probe beam)이 입사되면 박막내의 복굴절 특성에 의해서 이 빔의 편광은 원편광 상태로 바뀌게 된다. 이제  $As_2S_3$  박막의 두 지점에 서로 편광방향이 수직인 두가지 펄스빔을 조사하면 각 빔에 의해 서로 다른 복굴절 상태가 형성된다. 그 결과 선평광원 탐사빔이 이 박막을 통과하는 과정에서 두 가지의 원편광 상태로 변환하게 된다. 이제 이 두가지 원편광빔을 검광자(analyser)에 통과시키면 검광자의 각도에 따라 이진 진폭변조 또는 이진 위상변조 상태를 얻을 수 있게 된다.

이와 같은 이진 위상 변조특성을 이용하면  $As_2S_3$  박막에 이진 위상값(0,  $\pi$ )으로 이루어진 BPOF 필터의 이차원 패턴을 기록할 수 있게 된다.

$As_2S_3$  박막에서 펄스빔에 의한 복굴절현상은 실시간 내에 발생하므로 실시간 광유형인식이 가능하게 된다. 그리고  $As_2S_3$ 의 광변조 특성 중에서 특이할 점은 두가지 광변조 상태가 가역적(reversible)으로 바뀔 수 있다는 점이다. 그림 1에 펄스빔의 편광상태가 바뀌었을 때  $As_2S_3$ 에서의 광변조 과정을 나타내었다. 그림 1(a)는 검광자의 각도를 위상변조를 위한 각도에 고정하였을 때 박막의 입의 지점에 입사하는 펄스빔의 편광각도가 90° 바뀐 시점 부터 이 지점과 검광자를 통과한 후의 탐사빔의 진폭변화(과사치)를 나타낸 것이고, 그림 1(b)는 이 때 탐사빔의 진폭 및 위상변화를 나타낸 것이다. 즉 위상값은 (0,  $\pi$ ) 두 값만으로 표현되지만 진폭값은 1과 -1 사이에서 연속적으로 변화하게 된다. 즉 CABPF (continuous amplitude binary phase filter)의 값을 갖게 된다. 이 현상을 이용하면  $As_2S_3$ 에 입외의 BPOF 패턴을 기록한 후에 Inv\_BPOF를 가함으로써 이 BPOF를 지울 수 있게 된다. 이 때 Inv\_BPOF는 BPOF를 반전시킨 것으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Inv\_BPOF[F(u,v)] = \begin{cases} 1, & \text{if } BPOF[F(u,v)] = -1 \\ -1, & \text{if } BPOF[F(u,v)] = 1 \end{cases} \quad (7)$$

이제 여러 유형정보를 담고 있는 SDF BPOF가  $As_2S_3$  박막에 기록되어 있을 때, 이 곳에 입외의 BPOF나 Inv\_BPOF를 가함으로써 해당 유형에 관한 정보를 선택적으로 강조하거나 약화시킬 수 있게 된다. 따라서 이 같은 선택적 기록,소거 특성을 이용하여 fSDF 설계 시 최적 근사값  $a$ 를 얻기 위한 반복계산 과정을 광학적인 방법으로 구현할 수 있다.

4. 실험 및 고찰

(1) 컴퓨터 시뮬레이션

$As_2S_3$  박막에 fSDF 필터값을 실시간적으로 기록할 수 있음을 입증하기 위하여 fSDF를 이용한 광학적 유형 분류실험을 수행하였다. 본 실험에서 사용한 테스트 유형들을 그림 2에 나타 내었다. 어원이 만화 '아기공룡 둘리'에 등장하는 두 주인공의 앞모습과 옆모습들이다.

입외의 필터의 분류규칙은 필터를 설계할 때 미리 상관피크값을 어느 값으로 정하느냐에 따라 결정된다. 본 논문에서는 유형 분류를 위한 fSDF 필터를 설계 및 제작하였는데 모든 입력 유형을 한그룹으로 분류할 수 있도록 하였다. 즉 테스트 유형의 갯수를  $n$ 이라고 할 때 앞 식 (2)에서  $c_i = 1 (i=1,2,\dots,n)$ 로 하여 fSDF를 설계한다 fSDF 필터의 제작을 광학적인 방법으로 하기에 앞서서, 컴퓨터를 이용한 반복계산을 통해 fSDF를 계산하였고, 시뮬레이션에 의한 상관계산을 통해 fSDF 필터의

유형 분류 특성을 조사하였다. fSDF 계산은 유형들의 중첩을 입력 유형 평면에서 시행한 종래의 fSDF BPOF 경우와 본 논문에서 처럼 fSDF 필터를 광학적으로 제작하는 과정을 주파수 평면에서 시행하고 이 때  $As_2S_3$  박막의 변조특성에 의해서 SDF 필터가 CABPF인 경우의 두 경우에 대해 실시하여 그 결과들을 서로 비교하였다.

반복 계산과정에서 오차가 감소되는 정도를 그림 3에서 서로 비교해 보았다. 이 때 평균 오차값들은 목표로 하는 4개의 상관피크값들과 이 때 반복계산에서 실제로 얻어진 상관피크값들과의 차이들을 평균한 값들이다.

## (2) 광학 실험

fSDF 필터를 광학적으로 제작하기 위한 실험에서 (그림 4) 테스트 유형 입력용과 이진 필터의 입력용으로 2 개의 LCTV SLM이 사용되었다. 모델명은 Epson ET-20 인데 스크린은  $130 \times 160 \mu m$  크기의 작은 액정셀  $220 \times 240$ 개로 구성되어 있다. 이 모델의 각 액정셀에는 TFT(thin film transistor)가 내장되어 있기 때문에 다른 모델에 비해 화질이 안정되고, 대조비(contrast)가 크다.

LCTV SLM2에는  $32 \times 32$  크기의 BPOF 패턴을  $64 \times 64$  개의 액정셀에 ( $10.24 \times 8.32 mm$ ) 실는다. Ar 레이저의 평행빔에 실린 BPOF 패턴은 렌즈 L5( $f = 200 mm$ )에 의해  $As_2S_3$  박막에 흡수기록된다. 이 때 LCTV SLM2에서 필터의 크기를 확대하는 이유는 이 크기가 클 수록 박막에 입사하는 레이저 빔의 세기를 크게 할 수 있기 때문이다. 그리고 박막면에서의 BPOF의 크기는 LCTV SLM1의 입력유형이 주리에 변환된 스펙트럼의 크기와 일치해야 하는데 본 실험에서는  $3.89 \times 3.16 mm$  크기로 하였다. 정확한 크기는 LCTV SLM2와 렌즈 L5와의 거리 그리고 렌즈 L5와 박막 사이의 거리를 조정하여 얻을 수 있었다. 필터 패턴을  $As_2S_3$  박막에 기록하기 위한 Ar 레이저빔의 세기는 박막면 상에서 약  $30 mW/cm^2$ 이다. 초기 SDF BPOF를 박막에 기록하기 위하여 필터 패턴이 실린 Ar 레이저 빔을 약 5분간 조사하였다. LCTV SLM1에는 광학적 유형인식을 위한  $32 \times 32$  크기의 테스트 유형을  $32 \times 32$  개의 액정셀에 실는다. He-Ne 레이저 평행빔을 LCTV SLM1에 입사하면 입력유형은 렌즈 L1에 의해서 주리에 변환되어  $As_2S_3$  박막에서 BPOF와 광학적으로 곱해진다. 이제 입력유형과 BPOF와의 광상관 결과가 광세기분포 형태로 상관평면 P에 맺힌다. 이 광세기 분포를 CCD 카메라를 통해 모니터 상에서 관찰할 수도 있고, PC 메모리에 저장할 수도 있다. 본 실험에서는 모니터 상에 나타나는 광상관피크값의 세기를 관찰하면서 가장 최적 상태의 광학정렬 상태를 찾을 수 있다.

P면의 상관 결과는 CCD 카메라로 읽힌 다음, 상관 피크값만 추출되어 PC에 저장되는데 모든 테스트 유형에 의한 광상관 피크값을 차례로 저장할 수 있다.

사진 1은 테스트 유형들과 초기 SDF BPOF와의 광상관 결과, 상관 평면 P에 맺힌 광상관 세기분포를 사진찍은 것이다. 최종 상관평면에 입력유형이 일부 재성되어 나타 나는데 이는 입력유형의 주파수 스펙트럼이  $As_2S_3$  박막에서의 BPOF 값과 완전히 정합되지 못했기 때문이다. 재생된 입력 유형의 윤곽이 강조(edge enhanced)되어 나타 난 것은 주파수 영역에서 DC 항을 제거함으로써 고주파 성분만을 통과시켰기 때문이다. 사진 1을 보면 SDF의 세기 이진화 과정에서 상관피크치의 세기가 다르게 나타남을 알 수 있다.

fSDF 광학필터는  $As_2S_3$  박막에 BPOF[F<sub>1</sub>]들을 번갈아 가면서 반복조사하여 기록한다. 이 때 매 회 각 필터들의 조사하는 시간은 바로전 상관실험 결과 얻어진 상관 피크치 값들로 부터 계산된다. 본 실험에서는 최대 기록시간을 10초로 하고 광상관 피크치의 세기가 목표로 하는 상관세기비에 접근해 감에 따라 기록시간을 줄이면서 최적 광fSDF 필터가 기록되도록 하였다. 광 fSDF 필터를 기록하는 과정에서 박막면에 입사하는 Ar 레이저 빔의 광전력은 약  $30 mW/cm^2$ 이었는데 최적의 상관결과를 보이는 fSDF 광학필터는 약 8회의 반복조사 후에 형성됨을 보았다. 그림 5는 fSDF의 광학적 제작과정에서 광상관 피크치들의 오차가 감소하는 과정을 그린 것이다. 이 때 오차값은 컴퓨터 시뮬레이션의 경우와 마찬가지로 세기비에서의 오차를 계산한 것이다. 그리고 사진 2는 이와 같은 반복 광조사과정에 의해 얻어진 최적 fSDF 광학필터를 이용한 광상관처리 결과, 상관평면에 맺힌 광세기 분포를 사진찍은 것이다. 상관 피크값들의 세기가 거의 균일하게 나타남을 볼 수 있다.

## 5. 결론

$As_2S_3$  박막의 진폭 및 위상 변조 특성을 이용하여 fSDF 필터를 광학적 방법으로 제작하였다. 최적 fSDF 필터는  $As_2S_3$  박막의 변조특성에 의해서 CABPF 형태로 기록된다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 CABPF 값을 갖는 fSDF를 계산해 본 결과 최적 fSDF 필터값으로 수렴하는 것을 확인하였다. 최적 fSDF 필터를 광학적 방법으로 제작하는 실험과 이 광학 fSDF 필터를 이용한 광유형분류 실험을 통해  $As_2S_3$  박막에 fSDF 필터를 기록시킬 수 있음을 입증하였고, 이 박막이 실시간내에 필터값의 재기록 및 변경 등이 요구되는 다기능의 필터소자로 사용될 수 있음을 예상할 수 있었다.

## < 참고 문헌 >

1. C.F.Hester and D.Casasent, "Multivariate Technique for Multiclass Pattern Recognition," Appl. Opt. (19), 1758(1980).
2. J.L.Horner and P.D.Gianino, "Phase-Only Matched Filtering," Appl. Opt. (23), 812(1984).
3. J.L.Horner and J.Leger, "Pattern Recognition with Binary Phase-Only Filters," Appl. Opt. (24), 609 (1985).
4. D.Casasent and W.A.Rozzi, "Computer Generated Phase-Only Synthetic Discriminant Function Filters," Appl. Opt. (25), 3767(1986).
5. D.A.Jared and D.J.Ennis, "Inclusion of Filter Modulation in Synthetic Discriminant Function Construction," Appl. Opt. (28) 232(1989).
6. H.M.Kim, J.W.Jeong, C.H.Kwak and S.S.Lee, "Reconfigurable Binary Phase-Only Filter Written in a Photoinduced Anisotropic Amorphous  $As_2S_3$  Thin Film," submitted for publishing on Opt. Lett..

이 논문은 과학기술처 특정연구과제에 관련된 것입니다.

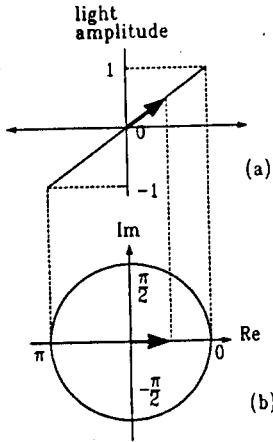


그림 1  $As_2S_3$  박막의 CABP 변조  
(a) 암사범의 진폭변화  
(b) 위상 및 진폭변조

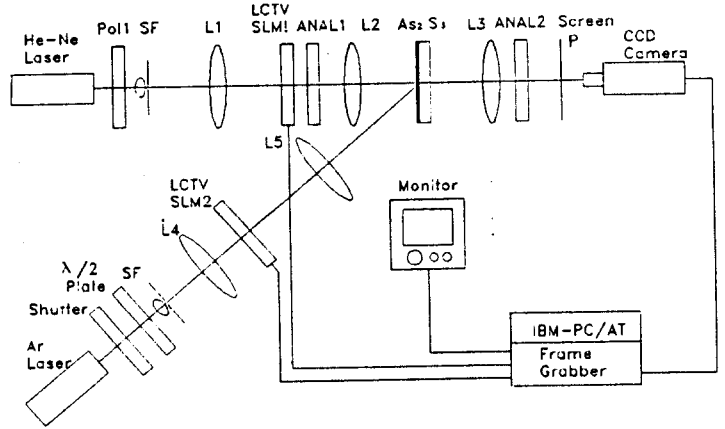


그림 4 광학 fSDF 필터 제작실험 구성도



그림 2 테스트 유형물

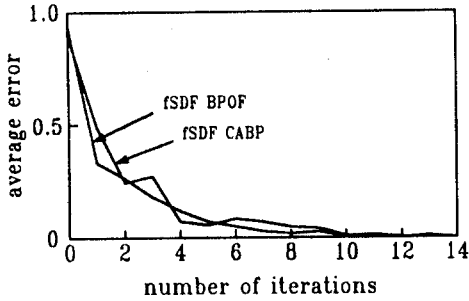


그림 3 fSDF 설계시 반복제산에 의한 상관오차의 감소

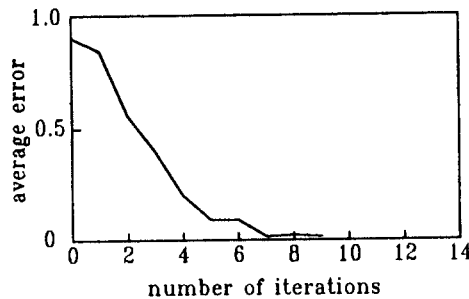


그림 5 광학 fSDF 필터 제작에 따른 광상관오차의 감소

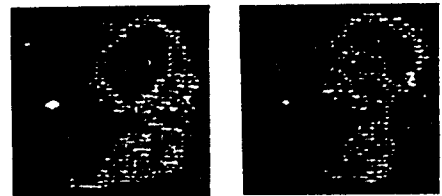
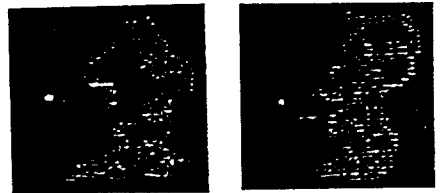


사진 1 초기 SDF BPOF에 의한 광상관결과

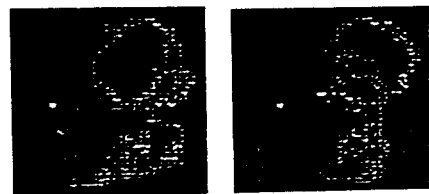


사진 2 최적 fSDF 필터에 의한 광상관결과