

논문 2012-49SP-2-2

간섭무늬 영상 등고선 해석과 보간법을 이용한 박막의 삼차원 정보 형상화

(3D Simulation of Thin Film using Contour Analysis of Interference
Fringe Image and Interpolation Method)

김진형*, 고윤호**

(Jin Hyoung Kim and Yun-Ho Ko)

요약

본 논문에서는 박막의 삼차원 형상을 신속하게 획득하기 위한 새로운 방법을 제안한다. 기존의 반사광 측정 장치에 기반한 박막 측정 장비들은 170포인트에 대한 두께를 측정하는데 약 30분 이상의 시간이 요구되므로 박막의 전체적인 형상 정보를 신속하게 파악하는데 적합하지 않다. 제안하는 방법은 Canny 경계검출기를 이용하여 간섭무늬 영상으로부터 등고선을 검출하는 영상 분석법을 기반으로 한다. 검출된 등고선에 대한 절대적인 두께를 측정하고 Borgefors 거리변환 알고리즘을 이용한 보간 처리를 통해 등고선으로부터 높이 맵 정보를 추출한다. 추출된 높이 맵은 DirectX를 사용하여 높이 맵 지형처리 기법으로 삼차원 형상화 된다. 제안된 방법은 적은 수를 가지는 등고선에 대한 높이 정보만을 실측하게 되므로 약 5분의 수행시간으로 박막의 전반적인 삼차원두께 패턴 정보를 얻을 수 있다.

Abstract

In this paper we proposes a new framework to obtain 3D shape information of thin film rapidly. The conventional equipments based on reflectometry are not suitable for obtaining 3D overall shape information of thin film rapidly since they require more than 30 minutes to measure the absolute thickness for 170 points. The proposed framework is based on an image analysis method that extracts contour lines from interference fringes images using Canny edge detector. The absolute thickness for contour lines are measured and then a height map from the contour lines is obtained by interpolation using Borgefors distance transformation. The extracted height map is visualized using the DirectX 3D terrain rendering method. The proposed framework can provide 3D overall shape information of thin film in about 5 minutes since relatively small number of real measurement for contour lines is required.

Keywords : Reflectometry, Canny edge detector, Interference fringe, Contour line, Borgefors distance transformation

I. 서론

디스플레이 장치로서 사용되던 CRT를 대신하여 상대적으로 두께가 얇고 가벼운 영상장치인 평판디스플레이

이(Flat Panel Display : FPD)의 사용이 보편화되고 있다^[1~2]. 일반적인 반도체 및 평판표시장치 공정은 여러 가지 유전체 박막, 반도체 박막, 금속 박막을 선택적으로 반도체 기판 또는 유리 위에 형성시키는 과정이다^[3~4]. 평판디스플레이 산업의 폭발적인 성장과 함께 더 짧은 시간에 더 많은 양을 생산하고, 불량률을 낮추는 것이 중요한 핵심 요소가 되고 있다. 이에 반도체 공정과 마찬가지로 평판디스플레이 공정에서도 품질을 결정하는 여러 요인 가운데 박막 두께의 제어가 차지하는 비중이 크게 자리 잡고 있다^[5~7].

* 학생회원, ** 평생회원-교신저자, 충남대학교 메카트로닉스공학과

(Department of Mechatronics Engineering,
Chungnam National University)

※ 이 연구는 2010년도 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었음

접수일자: 2011년11월1일, 수정완료일: 2012년1월31일

반도체 및 평판디스플레이 제품의 박막 미세패턴 및 두께 측정을 위한 반사광도계(reflectometry) 기반의 기존 장치들은 미세패턴의 특정 위치에서 두께를 측정하는데 있어서 우수한 결과를 보이고 있지만, 삼차원 두께 지도를 작성하기 위해서는 다수의 측정 지점에 대한 두께 정보를 취합하여야 하므로 측정에 많은 시간(170 포인트에 약 30분)이 소요되는 문제점을 가지고 있다. 반면 평판디스플레이 공정 시 다소 오차가 있더라도 박막 두께의 전반적 경향을 신속히 파악하여 공정을 관리하고자 하는 요구는 지속적으로 증가하고 있다.

이에 본 논문에서는 반사광도계를 이용해 획득된 간섭무늬 패턴 영상을 해석하여 상대적으로 적은 실측으로 박막의 두께 정보를 획득하고 이를 삼차원으로 형상화하기 위한 영상해석 기법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 반사광도계를 이용한 두께 측정 기술을 정리 요약하고, III장에서는 박막 두께 측정 고속화를 위한 등고선 검출 방법을 소개한다. IV장에서는 등고선을 이용하여 삼차원 두께 정보를 형상화하는 방법을 소개하며, V장에서는 실험을 통해 제안하는 방법의 성능을 기존 기술과 비교 분석한다. 마지막으로 VI장에서는 본 논문의 결론을 기술한다.

II. 반사광도계와 제안기법의 원리

1. 반사광도계의 기본원리

광학적 측정 방법은 박막 표면에서 반사광과 하부의 계면으로부터 반사광들에 의한 간섭현상 또는 광의 위상차를 이용하여 박막의 특성을 결정하는 것이다. 탐침을 이용한 기계적인 방법과 비교하여 광학적 측정 방법은 정확도 및 측정 속도가 우수하다. 측정 시료의 표면을 손상시키지 않으면서 설치가 용이하고, 극히 얇은 막에서부터 두꺼운 막까지 측정할 수 있다.

광학적 측정 방법 중 반사광도계(reflectometry)는 측정광이 시료의 표면에 수직으로 입사될 때 파장에 따라 박막으로부터 반사되는 빛의 강도를 측정하는 방법으로 측정할 수 있는 박막의 두께 범위가 넓고 측정 모호성이 없으며 미세한 부위를 측정할 수 있다는 장점이 있다.

반사광도계의 두께측정은 그림 1에서와 같이 입사광과 반사광의 간섭에 의한 파장별 보강 및 상쇄를 측정하여 두께 값을 얻는 장치이다^[8-9]. Tungsten-Halogen

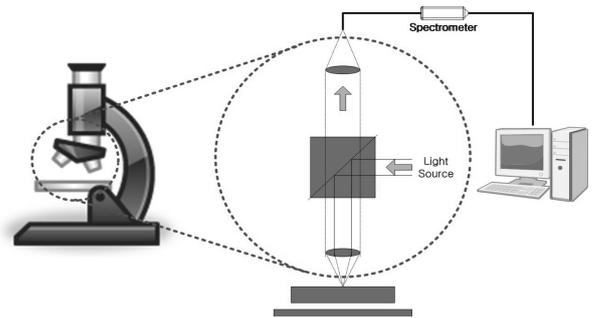


그림 1. 반사광도계 장치의 개념도
Fig. 1. Concept of Reflectometer.

광원에서 나온 빛이 광학계를 통해 스테이지 위에 놓인 박막에 입사되면 박막표면 및 기판과의 경계면에서 반사된 빛이 광섬유(optical fiber)를 통하여 측정기로 들어온다. 이 반사광은 여러 파장성분의 중첩파이기 때문에 분광기(spectrometer)에서 파장별 반사광선을 분리한 후에 CCD에 의해 디지털 신호로 변환되어 영상의 형태로 저장된다.

반사광도계를 이용한 두께 측정 장비의 경우 대부분은 박막으로부터 얻어진 파장별 광의 강도를 검출부에서 판독하여 그 값을 코시(Cauchy) 방정식이나 셀마이어(Selmeier) 방정식 등의 수식 또는 데이터 값으로 적용(fitting) 후, 최소의 편차가 되는 값을 그 박막의 두께로 산정한다. 하지만 이런 경우 임의의 방정식이나 기존의 데이터를 가지고 적용시키는데 소요되는 시간이 수초에서 수분 정도가 된다. 또한 이러한 방법으로 두께지도도를 생성시키려면 측정의 면적에 따라서 여러 곳을 측정하여 두께의 분포도를 그려내어야 한다. 따라서 연속적으로 진행되는 공정장에서 박막의 두께 정보를 신속하게 얻기 위해서는 새로운 알고리즘에 대한 연구가 필요하다.

2. 제안 기법의 원리

그림 2는 반사광도계에서 얻어진 특정 단일 파장에 대한 간섭영상이다. 그림 2(a)의 단파장 영상에서 밝게 보이는 부분과 어둡게 보이는 부분은 각각 보강간섭과 상쇄간섭이 일어난 영역을 나타낸다. 그림 2(a)에서 인접한 화소들을 이용하여 같은 밝기나 어둡기의 점들을 선으로 연결하면 서로의 강도에 의해서 그림 2(b)에서와 같이 같은 두께를 가지는 등고선으로 표현될 수 있다. 따라서 반사광도계의 서로 다른 단파장을 가지는 간섭영상에서 등고선을 계속 작성해가면 다수의 등고선이 포함된 지도도를 완성할 수 있다. 이렇게 그려진 등고

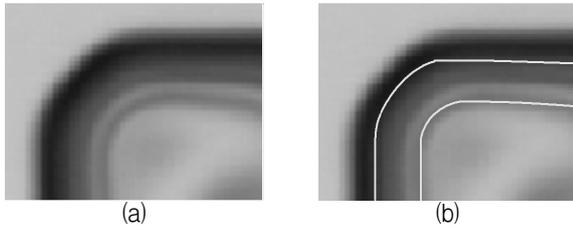


그림 2. 단파장 간섭영상에서의 등고선
Fig. 2. Contour lines in single wavelength fringe.

선 지도는 컴퓨터를 이용한 3차원 이미지로 표현할 수도 있고, 이런 3차원 이미지를 기초로 원하는 곳의 단면 형상을 그려낼 수 있다.

그림 3은 그림 2의 (b)에서 표시된 등고선이 동일한 높이를 가지고 있음을 보이기 위해 특정 단파장(λ)의 빛을 박막에 조사하였을 때 발생하는 광 간섭 현상을 도시한 것이다. 특정 파장의 입사광 중 일부는 투명 박막의 표면을 반사하고 일부는 투명 박막을 투과하여 기판(substrate)에 반사하게 되는데 이들 두 빛이 간섭현상을 일으킨다. 입사광이 수직으로 조사 될 때 두 빛이 보강간섭을 하는 경우 간섭영상은 밝게 나타나고 식 (1)에 따라 인접한 위치에 있는 두 지점은 동일한 간섭 효과에 의해 동일한 박막의 두께 d 를 가진다고 할 수 있다. 또 두 빛이 상쇄간섭을 하는 경우 간섭영상은 어둡게 나타나고 식 (2)에 따라 인접한 위치에 있는 두 지점은 동일한 박막 두께 d 를 가진다고 할 수 있다^[8].

$$2nd = N\lambda \tag{1}$$

$$2nd = N\lambda + (1/2)\lambda \tag{2}$$

여기서 n 은 박막에 조사된 단파장에 대한 굴절률이며, N 은 양의 정수이다.

그림 4는 제안된 알고리즘의 전체 구성도를 표시한 것이다. 먼저 간섭무늬 패턴 영상을 해석하여 두께가

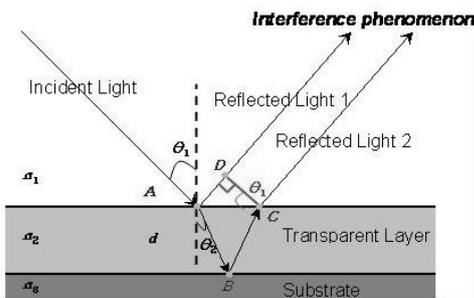


그림 3. 박막에서의 광 간섭현상
Fig. 3. Photointerference.

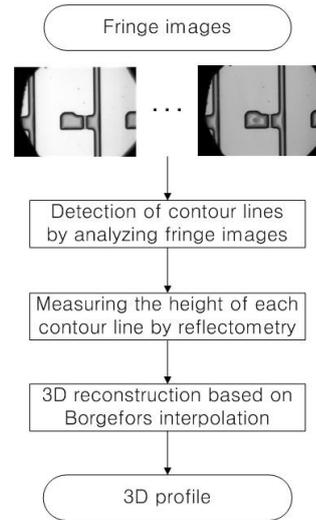


그림 4. 알고리즘 순서도
Fig. 4. Algorithm flow chart.

존재하는 영역을 관심영역(Region of Interest)으로 구분하게 되는데, 이를 통해 이후 과정들을 관심영역에만 한정시킴으로써 영상 해석을 고속화한다. 다음으로 29개의 서로 다른 단파장을 이용해 얻어진 간섭무늬 패턴 영상에서 등고선 정보를 추출하여 연결 관계를 해석함으로써 소수의 실제적 측정을 통해 두께 정보의 경향을 신속하게 얻을 수 있게 된다. 다음으로 등고선의 보간과 높이 맵 지형처리 기법을 통해 사용자가 원하는 시점에서의 삼차원 박막 정보를 입체적으로 출력한다.

III. 등고선 형성 알고리즘

1. ROI(Region of Interest) 설정

간섭무늬 영상에서 두께가 존재하는 영역과 존재하지 않는 영역을 구분하고 두께 지도를 형성하기 위해 실질적 측정이 필요한 기준 위치 설정 알고리즘이 요구된다. 관심의 대상이 되는 영역을 마스크 영상으로 추출하여 이후의 과정에서는 영상 해석에 불필요한 부분을 제거함으로써 수행 속도를 단축시킬 수 있다. 그림 5는 ROI 설정 알고리즘의 순서를 나타낸다.

우선 그림 6(a)의 입력 영상의 1차 미분을 이용하는 Sobel 연산을 통하여 그림 6(b)와 같이 경계를 검출한다. 검출된 결과 영상을 문턱치화(thresholding) 하여 그림 6(c)의 이진 영상을 얻는다. 이진 영상에서는 사용자로부터 측정하고자 하는 관심이 되는 기준 위치를 입력받아 검은색 영역을 그림 6(d)와 같이 영역 채움(region filling) 한다. 마지막으로 형태학 필터

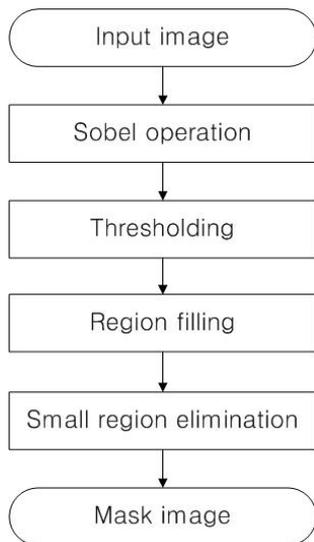


그림 5. 관심영역 설정 순서도
 Fig. 5. ROI selection flow chart.

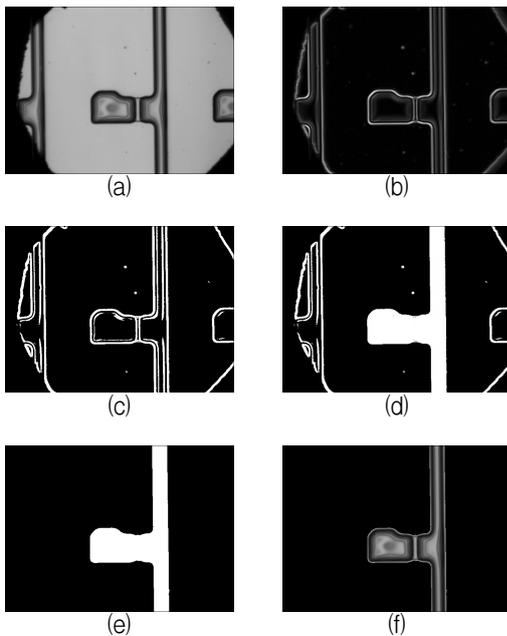


그림 6. 관심영역 추출 (a) 입력 영상, (b) Sobel 연산, (c) 이진 영상, (d) 영역 채움, (e) ROI 마스크, (f) ROI 결과
 Fig. 6. ROI extraction (a) Input image, (b) Sobel operation, (c) thresholding, (d) region filling, (e) ROI mask, (f) ROI result.

(morphology filter) 중 확장(dilation)과 침식(erosion)을 수행하여 두께가 얇은 영역을 제거함으로써 그림 6(e)와 같은 마스크 영상을 얻는다. 그림 6(f)는 마스크 연산을 이용하여 입력 영상에서 두께가 존재하는 영역만 추출한 결과 영상이다.

2. 등고선 정보 추출

그림 7은 등고선 추출 순서를 나타낸다. 서로 다른 단과장의 간섭무늬 영상에서 경계검출 방법으로 각각의 등고선을 획득한 후 이 정보들을 병합하여 하나의 등고선 맵을 형성한다.

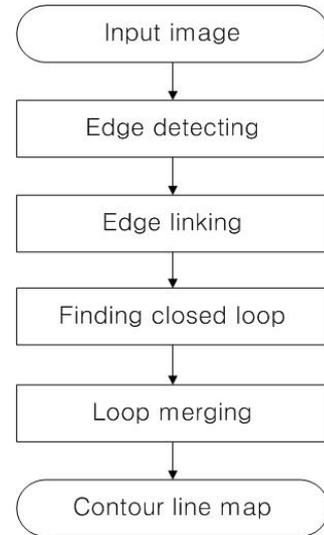


그림 7. 등고선 추출 알고리즘 순서도
 Fig. 7. Flow chart of contour line detection algorithm.

가. Canny 경계 검출(Canny edge detector)

등고선을 추출하기 위한 방법으로 영상의 경계를 이용한다. 박막의 간섭무늬 영상은 매우 조밀한 에지를 가지고 있기 때문에 다소 수행속도가 느리더라도 성능이 우수한 Canny 경계 검출(Canny edge detector) 알고리즘을 사용하여 정확한 경계를 검출할 필요가 있다 [10-11].

전처리 과정으로 영상의 잡음을 제거하기 위해 저주파 가우시안 필터(Gaussian filter)를 사용하여 영상의 잡음을 제거한 후 Sobel 연산자(Sobel operator)를 적용하여 경계 정도를 얻는다. 이 과정을 Canny enhancer라 하며 그림 8은 입력 영상에서 관심영역 내의 Canny



그림 8. Canny enhancer 결과 (a) Gaussian filter 결과, (b) Canny enhancer 결과
 Fig. 8. Result of Canny enhancer (a) Gaussian filter result, (b) Canny enhancer result.

enhancer 결과를 나타낸다.

Sobel 연산자를 통해 얻은 경계 정도는 폭이 넓게 나타나게 되는데 각각의 경계 위치에서 에지에 수직하는 (edge normal) 방향으로 이웃하는 두 픽셀과 비교하여 최대값을 갖지 않으면 해당 픽셀을 경계에서 제거하는 비-최대값 억제(non-maximum suppression)를 통해 그림 9(a)의 단일 픽셀의 폭으로 나타낼 수 있다. 마지막으로 2개의 임계값으로 이진 영상을 얻는 히스테리시스 문턱치화(hysteresis thresholding)를 수행하여 그림 9(b)와 같은 경계 영상을 얻는다.

Canny 경계 검출기는 전처리 과정에서 수행하는 가우시안 필터의 σ 파라미터에 의해 결과가 달라진다. 일반적으로 σ 값을 크게 할수록 노이즈에 강한 특성을 가지지만 경계에 대한 정보를 일부 유실하게 된다. 이렇게 몇 개의 화소가 경계로 검출되지 못할 경우 추출된 경계가 완전한 폐루프의 등고선을 형성하지 못할 수도 있다. 서로 다른 σ 값을 통해 추출된 경계 정보를 병합하면 이러한 경계 정보의 유실을 보완 할 수 있다. 본 따라서 논문에서는 복수의 σ 값을 사용하여 경계를 얻고 이를 논리 OR 연산을 통해 합성함으로써 노이즈에 강인하고 경계를 보다 자연스럽게 만드는 방법을 사



그림 9. Canny 경계 검출 결과 (a) 비 최대값 억제 결과, (b) Canny 경계 검출 영상
Fig. 9. Result of Canny edge detection (a) non-maximum suppression result (b) Canny edge detection result.

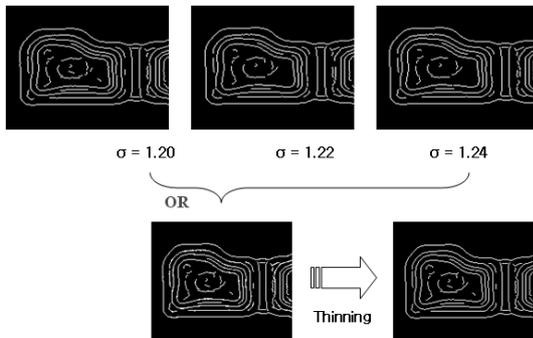


그림 10. 제안하는 복수 파라미터 σ 를 통한 경계 검출
Fig. 10. Proposed Edge detection with different standard deviation parameter.

용한다. OR 연산을 통한 결과는 두꺼운 에지로 형성되므로 후처리로 형태학 세션화 알고리즘을 통해 단일 픽셀의 두께를 가지는 에지로 만든다. 그림 10은 복수 파라미터를 통해 경계를 검출하는 전체 과정을 나타낸다.

나. 경계 연결(Edge Linking)

등고선을 얻기 위해서는 완벽한 폐루프를 이루어야 하나 경계 검출기 성능의 한계로 연결되지 않은 에지가 발생한다. 따라서 경계 연결 알고리즘을 통해 이러한 에지를 연결하는 과정이 필요하다. 본 논문에서는 경계 연결을 위하여 에지의 크기(strength)와 방향(direction)을 이용하여 에지의 연속적인 특성을 찾는 국부 처리(local processing) 방법을 사용하였다^[12]. 이 방법은 이진화에 의해 에지로 결정된 위치에서 에지로 결정되지 않은 이웃하는 픽셀의 에지 값과 유사한 정도를 비교하여 에지를 연결하는 방법이다. 그림 11은 경계 연결 처리의 결과를 나타낸다.

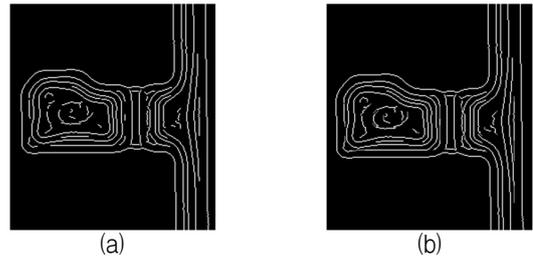


그림 11. Edge linking 결과
(a) 단절된 에지, (b) 에지 연결
Fig. 11. Result of edge linking (a) unconnected edge, (b) edge linking.

다. 폐루프 검출(Find closed loop)

그림 11(b)를 입력 영상으로 각각의 연결된 경계를 레이블링 알고리즘을 통해 구분한다. 레이블링된 경계들 중 영상의 가장자리에 화소가 2개 이상 존재하는 경

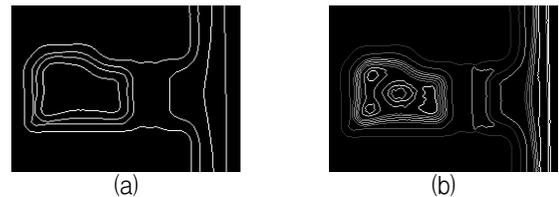


그림 12. 폐루프 검출과 루프 병합
(a) 폐루프, (b) 병합된 폐루프
Fig. 12. Finding closed loop and loop merging. (a) closed loop, (b) merged closed loop

우 페루프로 선정한다. 이는 그림 12(a)의 수직 방향으로의 곡선에서와 같이 온전한 페루프를 형성하지는 못하였으나 동일한 높이를 가지는 것으로 간주할 수 있는 경계이다.

그 외의 레이블링된 각 경계에 대해서는 8 인접한 화소가 2개 미만인 화소들을 찾고 이를 순차적으로 제거한다. 이후 레이블링된 경계의 한 지점에서 출발하여 체인코드에서와 같이 8 인접한 새로운 지점들을 따라갈 때 다시 원래의 출발지점으로 돌아올 수 있는 경계를 페루프로 선정한다. 그림 12(a)는 특정 파장의 영상에서 검출된 페루프를 도시한 것이다.

라. 루프 병합(loop merging)

식(1), (2)를 통해 살펴본 바와 같이 단일 파장 빛에 대한 보강, 상쇄 간섭 현상으로 추출한 페루프의 위치는 입사되는 빛의 파장에 따라 다르게 나타나게 된다. 다수의 페루프를 이용하는 경우 보다 나은 삼차원 정보를 기대할 수 있으므로 여러 파장에서 얻은 페루프를 병합하는 과정이 요구된다. 이때 서로 접하게 되거나 상호 교차되는 페루프는 병합에서 제외시킨다. 이렇게 병합된 페루프를 등고선으로 정의하는데 그림 12(b)는 최종 얻어진 등고선의 형태를 보인 것이다.

IV. 높이 맵 지형처리 기법

높이 맵은 영상 각 화소의 높이를 0 에서 255 사이의 명암 값으로 나타낸 것이다. 높이 맵 지형처리 기법은 3D로 형상화 하고자 하는 등고선을 이차원 높이 맵으로 만들고, 높이 맵 정보를 이용하여 삼차원 지형으로 재구축 하는 것을 의미한다.

1. 등고선 보간

III장에서 얻은 등고선은 추출된 등고선 위치에서만 반사광도계를 통한 실측에 의해 그 높이가 정해진다. 따라서 등고선 영상을 높이 맵으로 변환하기 위해서는 등고선 보간(interpolation) 과정이 필요하다. 등고선 보간에서의 요점은 보간이 필요한 내부점에서 이웃 등고선까지의 ‘가까운 정도’를 어떻게 수학적으로 정의하는냐에 있다. 이를 위해 내부점과 등고선간의 가까운 정도를 그들을 잇는 최단 경로의 길이로 정의한다.

그림 13에서 높이를 구하고자 하는 임의의 내부점을 P 라 할 때 바깥 등고선을 C_{out} , 안쪽 등고선을 C_{in} 이

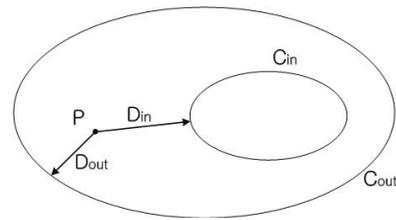


그림 13. 등고선 보간
Fig. 13. Contour interpolation.

라 하고 그 각각의 높이를 H_{out} , H_{in} 이라 한다. P 에서 C_{out} 까지의 최단거리를 D_{out} , P 에서 C_{in} 까지의 최단 거리를 D_{in} 이라 한다. 이때 점 P 의 높이 H 는 식 (3)에서와 같은 선형 보간식으로 구할 수 있다.

$$H = \frac{D_{out}}{D_{out} + D_{in}} \times (C_{in} - C_{out}) + C_{out} \quad (3)$$

따라서 등고선 영상으로부터 보간법을 통하여 높이 맵을 얻기 위해서는 내부점의 최단거리 계산과정과 인접 등고선을 검출하여 높이를 구하는 과정이 요구된다.

2. Borgfors 거리변환 알고리즘

등고선의 내부점에서 등고선까지의 최단거리인 D_{out} 과 D_{in} 을 구하기 위해 그림 14와 같은 두 개의 Borgfors 거리변환 마스크를 사용한다^[13-14]. 여기서 F 는 전방 마스크를 B 는 후방 마스크를 나타낸다. 각각의 마스크에서 0으로 표시된 화소가 중심이고 그 외의 네 화소의 값은 중심 화소까지의 국부거리를 나타낸다.

Borgfors 거리변환 방법은 등고선이 아닌 내부점 화소 값을 가장 가까운 등고선까지의 거리로 변환한다. 등고선으로부터의 거리를 나타내는 영상 I 에 대해 표 1의 의사코드로 나타낸 전방 주사를 수행한 후, 그 결과 영상에 다시 후방 주사를 수행하면 거리변환이 완료된다. 전방 마스크는 영상의 왼쪽 위에서 오른쪽 아래로 래스터 주사되며, 후방 마스크는 오른쪽 아래에서 왼쪽 위로 적용된다. 영상 I 의 새로운 값은 전방 또는 후방

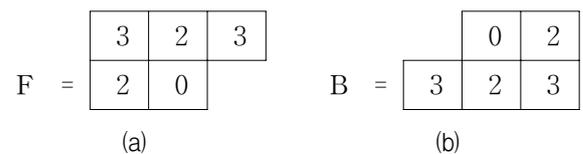


그림 14. Borgfors 거리변환 마스크 (a) 전방, (b) 후방
Fig. 14. Borgfors mask for distance transformation.
(a) forward, (b) backward

표 1. Borgefors 거리변환 알고리즘
Table 1. Borgefors distance transformation algorithm.

전방 주사	for $i=1, \dots, \text{Height}-2$ do for $j=1, \dots, \text{Width}-2$ do if ($I[i][j] \neq W$) $I[i][j] = \min(I[i+x][j+y] + F[x][y])$ where $(x,y) \in F$ and $I[i+x][j+y] \neq W$
후방 주사	for $i=\text{Height}-2, \dots, 1$ do for $j=\text{Width}-2, \dots, 1$ do if ($I[i][j] \neq W$) $I[i][j] = \min(I[i+x][j+y] + B[x][y])$ where $(x,y) \in B$ and $I[i+x][j+y] \neq W$

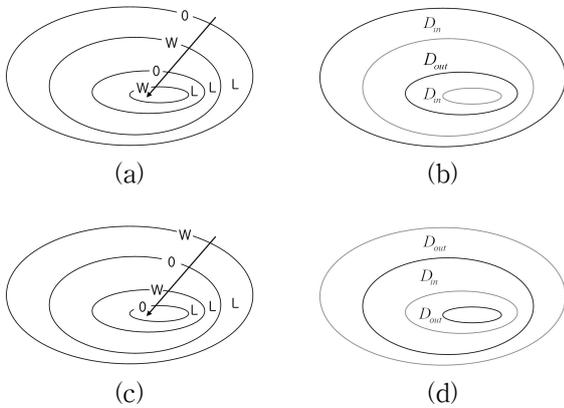


그림 15. Borgefors 거리변환 결과
Fig. 15. The result of Borgefors distance transformation.

마스크 내의 5개 마스크 계수값과 이에 대응하는 화소 값을 합한 값 중 최소값이 된다.

여기서 거리를 나타내는 영상 I 의 값이 W 인 화소는 거리변환 알고리즘이 진행되는 것을 막기 위한 장애물 역할을 수행한다. Borgefors 거리변환 알고리즘을 통해 D_{out} 과 D_{in} 을 구하는 기존 방법은 다음과 같다. 그림 15의 (a)에서와 같이 외곽으로부터 홀수 번째 등고선의 거리는 0, 모든 내부점은 충분히 큰 값인 L , 그리고 짝수 번째 등고선은 W ($W = L + 1$)로 영상 I 를 초기화한 후 전방주사와 후방주사를 차례로 수행한다. 이러한 과정을 통해 얻어진 영상은 그림 15의 (b)에서와 같이 홀수 번째 등고선들을 기준으로 D_{in} 과 D_{out} 을 교대로 가지게 된다. 만약 그림 15의 (c)에서와 같이 순서를 바꾸어 홀수 번째 등고선의 거리를 W , 짝수 번째 등고선을 0으로 하였다면 그림 15의 (d)에서와 같이 내부점들은 이전과는 반대로 짝수 번째 등고선을 기준으로 D_{out} 과 D_{in} 을 교대로 가지게 된다. 이러한 과정을 통해 등고선 내부에 있는 임의의 점에서 D_{out} 과 D_{in} 을

구할 수 있지만 만약 홀수 번째와 짝수 번째 등고선을 정의할 수 없는 경우라면 이러한 방법을 적용할 수 없는 문제가 발생한다.

3. 제안된 등고선의 최단거리 검출과 보간

그림 16(a)의 경우는 홀수 번째 등고선과 짝수 번째 등고선의 순서가 명확하여 앞서 설명한 것과 같이 L 과 W 를 정의함으로써 Borgefors 거리변환 알고리즘으로 최단거리를 계산할 수 있다. 하지만 그림 16(b)의 경우와 같이 C_3 의 내부 등고선 C_1 과 C_2 는 순차적이지 않아 L 과 W 의 정의가 불가능하므로 기존의 거리변환 알고리즘을 적용할 수 없다. 본 논문에서는 패턴이 불규칙한 등고선에서도 최단거리를 자동으로 추출할 수 있는 방법을 제안한다.

그림 16의 (c)에서와 같이 하나의 등고선 C_1 을 0, 모든 내부점을 L , 그리고 나머지 등고선을 W 라 설정하고 Borgefors 알고리즘을 적용하면 C_1 을 중심으로 다른 등고선을 넘어가지 않는 영역에 대한 거리변환이 이루어진다. 그 결과 그림 16의 (d)에서와 같이 C_1 등고선의 내부 영역에서는 D_{in} 을 갖고 외부 영역에서는 D_{out} 의 값을 갖는다. 이런 과정을 등고선 C_2 와 C_3 를 포함한 모든 등고선에 적용한다. 이러한 과정 후 등고선 내부 임의의 점은 하나 이상의 D_{in} 과 D_{out} 의 값을 가지게 된다. 만약 둘 이상의 D_{out} 값이 존재하는 경우보다 적은 값을 선택한다. 예를 들어 그림 16(d)의 점 P 에서는 C_1 등고선으로부터 D_{out} , C_2 등고선으로부터 D_{out} , C_3 등고선으로부터 D_{in} 을 얻을 수 있다. 이때 두 개의 다른 값 중에서 최단 거리인 작은 값을 선

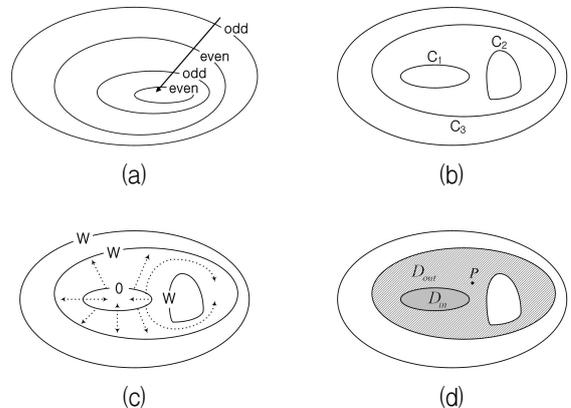


그림 16. 제안하는 Borgefors 알고리즘
Fig. 16. Proposed Borgefors algorithm.

택하면 점 P 에 대한 최단 거리 D_{in} 과 D_{out} 을 구하는 거리 변환이 완료된다.

위의 과정을 통하여 모든 등고선 내부점에 대한 D_{in} 과 D_{out} 의 값을 얻게 되며, 이들 값을 이용하여 식 (3)에 따라 선형 보간을 수행하면 등고선 맵으로부터 높이 맵 영상을 얻을 수 있다. 제안된 등고선 최단거리 검출과 보간 과정은 홀수 번째 등고선과 짝수 번째 등고선의 순서가 명확하지 않은 경우에 적용할 수 있는 장점이 있다. 하지만 거리변환 수행 횟수와 거리변환 결과를 저장하기 위한 메모리가 기존 방법에 비해 등고선의 개수에 비례하여 증가하는 이율배반성을 가진다.

V. 실험결과

그림 17(a)는 III장에서 제안한 등고선 추출 방법을

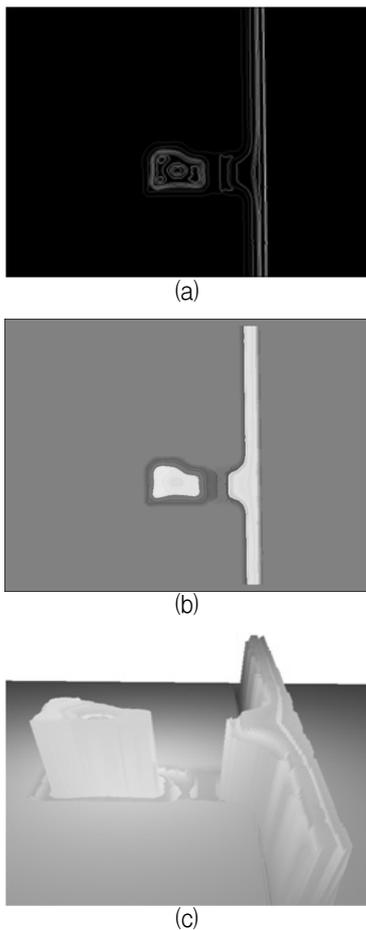


그림 17. 등고선 검출과 결과
 (a) 등고선 맵, (b) 높이 맵, (c) 삼차원 형상화
 Fig. 17. Contour detection and results
 (a) contour map, (b) height map, (c) 3D profile.

이용하여 29개의 서로 다른 단과장으로부터 촬영된 간섭무늬 영상열로부터 등고선을 추출한 결과를 보여준다. 총 29개의 영상으로부터 얻은 등고선은 50개이지만, 서로 접하거나 상호 교차되는 등고선을 제외하고 병합한 결과 그림 17(a)에서는 24개의 등고선으로 이루어진 등고선 맵을 얻을 수 있다.

등고선 맵의 24개 등고선 두께 정보를 실측하여 IV장에서 제안한 등고선 보간 기법을 적용한다. 등고선 영상은 각각의 등고선에서만 높이 정보를 가지고 있기 때문에 높이를 알 수 없는 영역에서 Borgefors 선형 보간을 수행하여 그림 17(b)와 같은 높이 맵 정보를 얻는다. 2차원 높이 맵 정보는 DirectX를 이용하여 3차원 지형으로 재구축 되는데 그 결과는 그림 17(c)와 같다.

기존 반사광 측정 장치에서는 그림 17(c) 수준의 3차원 정보를 얻기 위해서는 최소 170 포인트 이상의 지점에 대한 측정이 필요하다. 그림 18(a)는 그림 17(c) 수준의 3차원 정보를 얻기 위해 반사광 측정 장치로 실측을 수행해야 하는 170개의 포인트를 나타내고 있다. 여기서 170개의 측정 지점은 영상 전체 중 중요 박막이 포함된 일부만을 포함한 것이다. 따라서 그림 17(c)와 같이 영상 전반에 대한 삼차원 형상을 얻기 위해서는 수백 내지 수십 배 이상의 측정 지점이 추가로 요구

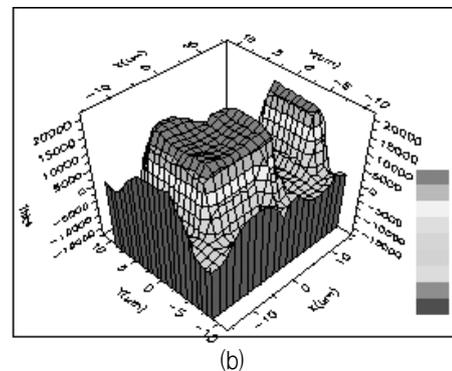
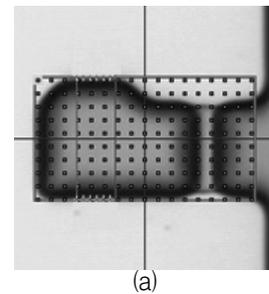


그림 18. 기존 반사광 측정 장치 결과
 (a) 측정 지점, (b) 삼차원 형상
 Fig. 18. Result of the conventional reflectometer
 (a) measured points, (b) 3D profile.

표 2. 수행시간(분)
Table 2. Process time(minute).

	기존 방식	제안 방식
170 point	31.16 m	—
24 point	—	4.58 m

된다. 그림 18(b)는 이들 측정 지점에 대한 측정 결과를 삼차원 형상화 한 것이다. 이때 하나의 포인트를 측정 하는데 약 11초의 시간이 요구된다. 하지만 제안된 방법에서는 동일한 높이 정보를 가지는 등고선을 추출하여 170 포인트 중 실제적 측정이 필요한 포인트를 24 포인트로 감소시킬 수 있다. 그 결과 측정소요 시간이 급격히 줄어들고 있음을 표 2에서 보이고 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 박막 영상에서 두께지도를 형성하기 위해 박막의 간섭무늬 패턴 영상을 해석하여 두께 정보를 획득하고 이를 삼차원으로 형상화하는데 필요한 알고리즘을 제안하였다. 제안된 방법은 등고선을 검출하는 방법으로 실제적 측정이 필요한 포인트를 줄여주는 방법으로 보다 향상된 성능을 보였다. 제안된 방법은 박막의 두께 정보를 빠르게 파악할 수 있을 뿐만 아니라 측정된 3차원 두께 지도를 이용하여 평판디스플레이 제품 등의 특정 지점에 대한 높이 측정 결과의 신뢰성을 향상시킬 수 있다.

참 고 문 헌

[1] 이진호, 윤선진, 도이미, “정보 표시소자 기술개발 동향-정보통신용 Emissive Display 중심으로-,” 전자공학회논문지, 제29권, 제6호, 93-103쪽, 2002년.
[2] 임성규, “평판 디스플레이 현황 및 발전전망,” 전자공학회지, 제28권, 제4호, pp. 20-23, 2001.
[3] W. M. Moreau, “Semiconductor Lithography,” Plenum Publishing Co., New York, 1988.
[4] D. J. Elliott, “Integrated Circuit Fabrication Technology,” 2nd edition, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, 1989.
[5] C. J. Lu and D. M. Tasi, “Defect inspection of patterned thin film transistor-liquid crystal display panels using a fast-image-based singular value decomposition,” Int. J. Prod. Res., Vol. 42, No. 20, pp. 4331-4351, October, 2004.
[6] W. K. Pratt, S. S. Sawkar, and Kevin O’Reilly,

“Automatic blemish detection in liquid crystal flat panel displays,” SPIE Mach Vision App. in Industrial Inspection, Vol. 3306, pp. 2-13, January, 1998.

- [7] K. Taniguchi and S. Tatsumi, “A detection method for irregular lightness variation of low contrast,” IEEE Systems, Man and Cybernetics, Vol. 7, pp. 6401-6406, 2004.
[8] 정석균, “디스플레이 공정과 박막두께측정,” 공업화학전망, 제8권 제4호, pp.96-105, 2005.
[9] Min-Cheol Park and Seung-Woo Kim, “Compensation of phase change on reflection in white-light interferometry for step height measurement,” Optics Letters, Vol. 26, No. 7, April, 2001.
[10] J. F. Canny, “A computational approach to edge detection”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. PAMI-8, pp.679-698, 1986
[11] J. R. Parker, “Algorithms for Image Processing and Computer Vision,” Wiley Computer Publishing, pp. 23-29, 1997.
[12] R. C. Gonzalez, R. E. Woods, “Digital Image Processing,” Prentice Hall, pp. 585-587, 2002.
[13] G. Borgefors, “Distance transformation in digital images,” Computer Vision, Graphics and Image Processing, Vol. 34, pp. 344-371, 1986.
[14] G. Borgefors, I. Nystrom, “Discrete Skeletons from Distance Transforms in 2D and 3D,” Computational Imaging and Vision, Vol. 37, 2008.

— 저 자 소 개 —



김진형(학생회원)
 2010년 충남대학교 메카트로닉스
 공학과 졸업(학사)
 2010년~현재 충남대학교 메카트
 로닉스공학과 석사 과정
 <주관심분야 : 영상처리, 스테레
 오비전>



고윤호(평생회원)-교신저자
 1995년 부산대학교 전자공학과
 학사 졸업
 1997년 한국과학기술원 전기및전
 자공학과 석사 졸업
 2002년 한국과학기술원 전기및전
 자공학과 박사 졸업
 2002년~2004년 하이닉스반도체 선임연구원
 2004년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과
 부교수
 <주관심분야 : 영상신호처리, 컴퓨터비전, 영상인
 식, 영상압축>